

На правах рукописи

Мальшев Александр Иванович

**Газовый фактор
в эндогенных процессах**

Специальность 25.00.04
“Петрология, вулканология”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в Институте геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН.

Официальные оппоненты:

Когарко Лия Николаевна – доктор геолого-минералогических наук, академик
Российской академии наук

Анфилов Всеволод Николаевич – доктор геолого-минералогических наук,
член-корреспондент Российской академии наук

Рудницкий Владимир Францевич – доктор геолого-минералогических наук,
профессор

Ведущая организация – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Защита состоится 27 мая 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 004.021.02 при Учреждении Российской академии наук “Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН”

по адресу: 620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7.

Тел: (343) 371-19-97

Факс: (343) 371-52-52

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГГ УрО РАН

Автореферат разослан 20 марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чашухин И.С.

Актуальность проблемы

Изучение процессов, протекающих в глубинах Земли, является одним из приоритетных современных направлений геологической науки. Признается, что большое значение в этих процессах принадлежит дегазации глубоких горизонтов, а также форме этих процессов. В этом отношении газовая активность при вулканических явлениях рассматривается лишь как частный случай, возникающий в приповерхностных условиях в результате кристаллизации магматических расплавах. В глубинных условиях, как правило, исключается сама возможность существования вещества в газообразном состоянии. Существуют две главные причины, на которых основывается этот вывод. Первая причина связана с данными магматической геологии, свидетельствующие об исчезновении с глубиной в магматических породах газовых полостей или их реликтов. Эти данные могут свидетельствовать об исчезновении в магматических расплавах при сравнительно небольших давлениях газов в виде самостоятельной фазы. Вторая причина связана с современными представлениями физической науки, в соответствии с которыми все различия между газом и жидкостью исчезают в критической точке соответствующего вещества. Поскольку критические давления большинства летучих соединений по литостатическому эквиваленту укладываются в диапазоне сотен метров, то для больших глубин в соответствии с общезначимыми представлениями термин “газ” выводится из обращения и заменяются на абстрактное понятие “флюид”. Данную ситуацию усугубляет широкое распространение в теоретической геологии формализованного термодинамического макроподхода, в соответствии с которым газообразные соединения, не обладающие фазовыми границами и, соответственно, не образующие самостоятельную “фазу”, исчезают как самостоятельный объект исследований. Тем самым из поля зрения петрологов выпадают потоки летучих (газообразных) соединений, перемещающихся в сплошных средах диффузионным способом.

В связи с вышесказанным здесь и далее под газообразными соединениями в условиях сплошных сред понимаются такие молекулярные образования, которые не создают устойчивых молекулярных связей ни между собой, ни с вмещающими молекулярными структурами. Отсутствие этих связей создает благоприятные условия для диффузионного перемещения таких соединений в сплошных средах, включая кристаллические структуры. Само диффузионное перемещение осуществляется путем миграции комплексных дефектов.

Практические наблюдения в областях активного вулканизма, теоретические расчеты и модельные построения, обобщения и анализ опубликованных данных свидетельствуют о присутствии газовой составляющей на больших глубинах и, соответственно, в высокобарических условиях в специфической форме. При этом газовая составляющая играет определяющую роль в процессах петрогенеза и, в том числе, рудогенеза. Все большее вовлечение в сферу научных исследований глубоких горизонтов литосферы выдвигает

проблему изучения такой роли газовой составляющей достаточно важной проблемой для теоретической геологии. Этим определяется актуальность темы исследований.

Формулировка основной научной проблемы

Научная проблема состоит в том, что широко распространенное в петрологических и рудногенетических построениях понятие “флюид” не имеет конкретного вещественного или геохимического содержания и представляет собой условную терминологическую абстракцию. В то же время понятие “газ” по своему понятию несет конкретное содержание. Практические наблюдения и теоретические расчеты показывают, что газовая субстанция в эндогенных, в том числе в магматических процессах, может существовать в качестве самостоятельного и очень активного петрогенетического агента как при низких давлениях, так и в высокобарических условиях. Имеются основания полагать, что в высокобарических условиях эти газообразные соединения могут формировать конденсатные соединения и в сочетании с ними являться важным фактором эндогенных петрогенных процессов. Флюид в данном контексте можно рассматривать как перемещающийся из глубин Земли поток легких летучих (или потенциально летучих) соединений и состоящий из веществ, находящихся как в газообразном, так и в конденсированном (жидком) состояниях. Газообразная и жидкостная составляющие флюида резко различаются по своим миграционным способностям. Подвижность жидкостной составляющей флюида резко ограничивается наличием сил межмолекулярного взаимодействия, приводящих к формированию крупных молекулярных агрегатов – капель, молекулярных пленок и других жидких образований, способных перемещаться лишь в условиях пористых и трещиноватых пород под воздействием внешних гидростатических и динамических факторов. В условиях сплошных сред конденсатная составляющая флюида полностью теряет свою подвижность. Именно в этих условиях различия в миграционной способности газообразной и жидкостной составляющих флюида наиболее очевидны – газообразные соединения сохраняют свою подвижность даже в условиях пород, лишенных пористости и трещиноватости, и способны перемещаться диффузионным способом сквозь кристаллические решетки минералов и молекулярные структуры магматических расплавов. Направление перемещения определяется градиентами давления и концентрации газообразных соединений. Высокая миграционная способность газообразных соединений обеспечивает возможность перемещения и вещества из состава конденсатных образований в виде насыщенных паров находящихся в составе конденсата веществ. Следовательно, именно газообразная составляющая определяет энергетику и массоперенос флюидного потока в целом. В свою очередь, имеются теоретические предпосылки предполагать, что образующиеся из газовой смеси геохимически активные конденсаты играют существенную роль в петрогенезе и рудогенезе, а в более общем виде и в преобразовании вещественного состава планетарных недр.

Цель исследований

заключается в обосновании на практических наблюдениях и теоретических расчетах возможности существования самостоятельной газовой составляющей флюидных потоков не только при низких давлениях, сопровождающих эруптивные процессы, но и в высокobarических условиях, а также в обосновании важной петрогенетической роли как самих газообразных соединений, так и образуемых ими за счет переходов “газ–жидкость” конденсатных образований.

Фактический материал и методы исследований

Первоосновой данной работы стали наблюдения за эруптивным процессом влк. Безымянный. За семь лет наблюдений (1980–1987 гг.) автору представилась возможность стать свидетелем последовательности из 9 сравнительно кратковременных взрывно-эффузивных и 5 затяжных деформационно-экструзивно-эффузивных извержений. Уникальность этой последовательности заключается в том, что Безымянный в настоящее время – не только один из наиболее активных вулканов мира, но и, пожалуй, единственный вулкан со столь быстрой эволюцией эруптивного процесса, что позволило за сравнительно небольшой период собрать представительные данные. Эти детальные наблюдения свидетельствуют о ключевой роли газового фактора в петрогенезе вулканических пород, в формировании их фациального, минерального и минерального состава. Вместе с этими данными основу работы составляют результаты изучения некоторых месторождений Урала, в частности, залегающих среди продуктов древнего вулканизма медноколчеданных месторождений. При рассмотрении вопросов физико-химической эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов и некоторых аспектов петро- и рудогенеза в работе широко используются методы молекулярного физико-химического моделирования. Кроме того, большое значение в работе имеет анализ и обобщение имеющихся литературных данных.

Научная новизна и практическая значимость исследований

Понимание физического состояния и поведения летучих соединений в высокobarических эндогенных условиях достаточно важны для многих разделов эндогенной геологии. В частности, это относится к решению проблем переноса глубинной энергии и глубинного вещества, газового массопереноса, переноса рудных элементов, а также формирования углеводородных соединений при дегазационных процессах. При положительном решении вопроса о том, что магмы являются проводниками диффузионных газовых потоков, вышеназванные проблемы могут получить свое решение. В свою очередь диффузионные потоки газообразных соединений есть не что иное, как прояв-

ление планетарных процессов гравитационной дифференциации, являющейся мощным источником энергии. Эта энергия может лежать в основе магмообразования и динамической активности магматических систем, а также формировать мощные вулканические извержения. Вместе с этим, признание эффекта диффузионного перемещения газов в сплошной среде влечет за собой признания возможности переноса порообразующих соединений, в частности – кремнезема водной составляющей, в составе летучих соединений. Закономерная связь вариаций состава магм и их газонасыщенности является универсальной и наблюдается повсеместно. Газовый массоперенос представляет собой более эффективный механизм для эволюции вещественного состава магм по сравнению с гравитационной дифференциацией вещества в магматической камере и может быть привлечен к решению проблемы планетарного перераспределения вещества с образованием континентальной земной коры. Предполагаемое скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ может обуславливать образование рудосодержащих соединений и соединений углеводорода, формирующих концентрации полезных компонентов.

Выполненные исследования в качестве практического результата позволили:

1) изложить динамическую модель вулканического процесса, в соответствии с которой источником динамической активности магматических систем в приповерхностных условиях является рассеивание их тепла в окружающее пространство, сама активность возникает за счет выделения из расплава кристаллической и газовой фазы и нарастания внутриматричного давления, а сброс этого давления носит полициклический характер;

2) предложить динамическую модель магматического процесса, согласно которой основным источником динамической активности магматических систем является диффузионный поток эндогенных летучих в газообразном состоянии;

3) предложить модель физико-химической эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов, предполагающую возможность выпадения из высокотемпературной газовой смеси по мере ее остывания конденсирующихся веществ, для которых последовательность выпадения и остаточные содержания в газовой фазе однозначно контролируются РТ-условиями флюидного потока;

4) предложить дегазационную модель планетарной эволюции, согласно которой энергетику процессов этой эволюции обеспечивает постаккреционная планетарная дегазация; по мере затухания дегазационных процессов развитие обусловленной ими магмо-тектонической активности проходит через несколько последовательных стадий; одной из этих стадий, в частности, соответствует наблюдающаяся в настоящее время на Земле эпоха преимущественно линейной локализации дегазационных процессов и магмо-тектонической активности, приведшая к раскалыванию протоконтинентов Земли и к формированию спрединговых и субдукционных структур на ее поверхности;

5) показать роль отделения и сброса конденсата из газовой смеси для образования рудных и углеводородных соединений, формирующих концентрации полезных компонентов и месторождений полезных ископаемых.

6) обосновать значение РТ-области формирования углеводородных соединений (зон естественного углеводородного синтеза (ЕУС)) как наиболее благоприятного фактора для возникновения предбиологических состояний и последующего зарождения жизни.

Предложенные модели могут быть использованы в работах по петрогенезу и методологии изучения магматических серий и формаций. Вывод об участии конденсатов в формировании рудных месторождений и углеводородных скоплений может быть использован в разработке проблем формирования и размещения полезных ископаемых. Вывод о зонах ЕУС как о необходимом факторе возникновения предбиологических состояний может быть полезен для поисков жизни на других небесных телах солнечной системы.

Структура работы

Диссертационная работа имеет объем 480 страниц, содержит 243 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 538 наименований. Текст работы состоит из введения, трех частей и заключения. В первой части излагаются практические наблюдения и обобщения автора за процессами извержений в Камчатском регионе, а также более детальное изучение процессов извержений вулкана Безымянный. Активным наблюдениям подверглись 5 затяжных деформационно-экструзивно-эффузивных и 9 сравнительно кратковременных эксплозивно-эффузивных извержений. Полученные данные были использованы при разработке и обоснованию модели вулканического процесса. Вторая часть работы посвящена анализу изложенного в первой части фактического материала и обобщению с использованием литературных данных выявленных в ходе этого анализа закономерностей. В этой части работы в ходе последовательного нарастания глубины обобщений рассматриваются динамические модели вулканического и магматического процессов и дегазационная модель планетарной эволюции. В третьей части работы рассматриваются теоретические аспекты модели физико-химической эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов, и вытекающие из этой модели важные для практики положения о геохимически активных эндогенных конденсатах, играющих ключевое значение в формировании рудных концентраций (конденсат серы) и зон естественного углеводородного синтеза (конденсат сероводорода и диоксида углерода).

Апробация работы и публикации

Результаты исследований, а также сформулированные на их основе защищаемые положения и выводы, неоднократно представлялись и докладывались на многочисленных научных семинарах, симпозиумах, конференциях.

В частности, результаты докладывались на VI Всесоюзном вулканологическом совещании (Петропавловск-Камчатский, 1985 г.), на международных конференциях “Полезные ископаемые: формирование, прогноз, ресурсы” (Санкт-Петербург, 1999 г.), “Геодинамика и геоэкология” (Архангельск, 1999 г.), IUGG99 (Бирмингем, Великобритания, 1999 г.), “Металлогения древних и современных океанов” (Миасс, 2004 г.), “Города на вулканах 6, Тенерифе-2010” (Пуэрто де ла Круз, Испания, 2010 г.), “Дегазация Земли” (Москва, 2010 г.), на XXXIV Тектоническом совещании (Москва, 2001 г.) на II и IV Всероссийских симпозиумах по вулканологии и палеовулканологии (Екатеринбург, 2003 г., и Петропавловск-Камчатский, 2009 г., соответственно), на X петрографическом совещании (Апатиты, 2005 г.) и мн. других, а также представлялись заочно на LPSC XXXI–XXXII (Хьюстон, 2000–2001 гг.). По теме диссертации лично и в соавторстве опубликовано около 160 работ, изданных в нашей стране и за рубежом. В их числе три монографии, две в электронном журнале “Вестник Отделения наук о Земле РАН”, 28 статей опубликованы в журналах из списка ВАК.

Благодарности

Автор работы выражает глубокую признательность акад. В.А. Коротееву за помощь, поддержку и консультации в работах по теме диссертации. Автор благодарен акад. Н.П. Юшкину, Н.С. Горбачеву, В.Н. Сазонову, А.И. Альмухамедову, А.Я. Медведеву за ценные замечания к разделу работы, посвященному роли природного серного конденсата в рудообразующих процессах, за поддержку исследований в этом направлении, оказанную акад. В.И. Коваленко, чл.-корр. Н.М. Чернышовым, чл.-корр. В.Г. Сахно, Е.Т. Бубнову, Р.Г. Ибламинову, Е.К. Мархинину, Ю.Н. Нерадовскому, П.В. Панкратьеву, А.П. Хренову, А.Я. Шевко, М.П. Гора, Р.С. Родину, Н.А. Лизалек, В.П. Феоктистову, Л.И. Гурской, В.В. Масленникову, Д.И. Салихову, Г.И. Беликовой. За помощь и содействие в сборе первичной вулканологической информации автор благодарен Н.А. Жаринову, Ю.В. Демянчуку, А.И. Козыреву, Е.Ю. Ждановой, К.С. Киришеву, В.Н. Козеву, В.Г. Ушакову, В.П. Ханзутину, А.Б. Белоусову, А.П. Иванову, В.Д. Кукину, Б.Б. Магуськину, А.Б. Мациевскому, Ю.Ф. Скуридину, М.Л. Глаголеву, В.Д. Ципордею, М.А. Алидибирову, Н.М. Кравченко, А.П. Максимову, П.П. Фирстову. За помощь, содействие и поддержку в исследованиях уральских рудных месторождений автор особо признателен А.М. Виноградову, а также В.А. Прокину, В.П. Молошагу, В.В. Мурзину, К.П. Иванову, И.В. Семенову. Автор благодарен В.М. Нечухину за научные рекомендации и консультации по улучшению работы. И наконец за помощь, поддержку, участие в ряде направлений исследования и долготерпение автор очень признателен своей жене Л.К. Малышевой.

Защищаемые положения

I. Газовый фактор имеет ключевое значение вулканогенного петрогенеза, определяя форму вулканических извержений, разнообразие и вариации фациального, минерального и химического состава вулканитов, а также синхронную вулканической активности изменчивость состава самих вулканических газов.

II. Первоисточником зарождения и динамической активности магматических систем является диффузионный поток эндогенных летучих в газообразном состоянии, газовый фактор определяет энерго- и массоперенос в эндогенных процессах, а дегазационные процессы имеют определяющее значение для постаккреционной планетарной эволюции.

III. Скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ обуславливает существование ряда геохимических РТ-областей, среди которых большое теоретическое и практическое значение имеют: 1) область зон серной отгонки, в которой происходит сброс конденсата серы, имеющая ключевое значение для формирования многих типов рудных месторождений полезных ископаемых; 2) область зон водной отгонки, приводящая к появлению на пути эндогенных флюидов барьера нейтрализации и последующего зарождения волны повышенной кислотности; 3) область зон сероводородной и углекислотной отгонки, играющая существенную роль в формировании месторождений углеводородного сырья и в возникновении предбиологических состояний, т.е. в создании условий для возможного зарождения жизни.

Содержание работы

ЧАСТЬ I. НАБЛЮДЕНИЯ – ГАЗОВЫЙ ФАКТОР В ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Поведение летучих в процессе извержения

Летучие являются одним из основных факторов, определяющих форму извержения, поэтому большой интерес представляет вопрос о том, как меняется газонасыщенность ювенильного материала в ходе извержения. Основной источник информации о ее относительном изменении – анализ самого хода извержения, а также изучение последствий извержения. Еще одним, дополнительным, источником информации является сам облик выжимающегося лавового материала. Высокая пористость поверхности лавовых потоков Безымянного в значительной степени рассеивает и поглощает солнечный свет. Поэтому высокопористые потоки с пировойлочной текстурой поверхности с больших расстояний выглядят почти черными, хотя и состоят из светло-серого с легким зеленоватым оттенком андезита. С уменьшением пористости лав их внешний

облик светлеет, достигая естественного светло-серого цвета у плотных лав обелисков и наиболее вязких и “медленных” лавовых потоков. Все это позволяет на качественном уровне отслеживать изменчивость пористости выжимающихся лав, а следовательно, и с определенной степенью точности судить о газонасыщенности поступающего на поверхность ювенильного материала.

Наблюдения показали, что для большой группы извержений характерно наличие четко выраженной кульминации, сопровождающейся бурной эксплозивной деятельностью вулкана. Кульминации предшествует период лавинообразной активизации, первые признаки которой нередко проявляются за месяц и более до извержения. Сама активизация часто имеет непрерывно-импульсный характер, когда последовательно нарастающие вспышки активности вулкана разделяются интервалами его пониженной активности.

По мере приближения к кульминации поступающий на поверхность материал становится все более газонасыщенным, высокотемпературным и пластичным. В начальные периоды активизации он представлен жесткими, практически дегазированными в ходе предыдущих периодов активности, блоками, поверхность которых благодаря низкой пористости слабо поглощает солнечные лучи и даже с больших расстояний сохраняет естественный светло-серый цвет. По мере развития извержения жесткие блоки разрушаются, и на их месте появляется более газонасыщенная и высокотемпературная лава. Дополнительное поглощение солнечного света за счет более высокой пористости обуславливает ее кажущийся более темный цвет.

Меняется и характер извержения. В ходе обвалов, сопровождающих развитие экструзивного процесса, появляются и все более усиливаются признаки проявлений эффекта автоэксплозивности, особенно отчетливые для наиболее крупных обрушений. Последние все больше приобретают характерные черты автоэксплозивных лавин. Дальнейшее нарастание температуры, газонасыщенности и пластичности ювенильного материала, соответствующее общей активизации вулкана, создает предпосылки для формирования пирокластических потоков, а максимальная газонасыщенность, совпадающая с кульминацией извержения, соответствует практически непрерывным вертикальным газопепловым выбросам, образующим мощную эруптивную колонну. В 80-е годы, во время наблюдений автора, при этом происходило одновременное излияние наиболее пластичных, максимально пористых лав, для поверхности которых характерно повсеместное распространение пировойлочных текстур. Из-за максимально высокого поглощения света пористой поверхностью эти лавовые потоки на расстоянии выглядели практически черными.

Начиная с кульминационных моментов извержения, тенденция в изменении газонасыщенности меняет знак. Последовательное снижение количества летучих в ювенильном материале обуславливает переход от практически непрерывных вертикальных газопепловых выбросов сначала к формированию пирокластических потоков затухающей мощности, затем – ко все более редким автоэксплозивным лавинам. Завершает процесс стабилизации пере-

ход от остаточной экструзивной деятельности к затухающим деформациям привершинной части активного блока вулкана, сопровождающихся все более слабыми каменными лавинами. В процессе затухания извержения прослеживается определенная “лавинообразность”, отличающаяся от лавинообразности активизации вулкана лишь знаком, – чем ниже уровень активности вулкана, тем медленнее происходит ее снижение.

Как и активизация, процесс затухания извержения нередко имеет непрерывно-импульсный характер. В этом случае общая тенденция к снижению уровня активности вулкана осложняется кратковременными все более слабыми вспышками. В ходе каждого из этих импульсов можно заметить некоторое повышение температуры ювенильного материала, однако в целом на стадии затухания прослеживается обратная тенденция – температура ювенильного материала, участвующего в процессе извержения, постепенно снижается, так как уменьшающаяся скорость поступления на поверхность ювенильного материала уже не компенсирует его остывания.

Альтернативу описанной выше группе представляют извержения, у которых отсутствует четко выраженная кульминация, а максимальная активность вулкана сохраняется на довольно высоком уровне в течение довольно длительного времени (до года и более). Все это время вулкан находится в состоянии экструзивного или экструзивно-эффузивного извержения. Эксплозивная деятельность практически отсутствует. Лишь в ходе наиболее крупных обрушений в большей или меньшей степени проявляются признаки автоэксплозивности. В состоянии, подобном описанному, вулкан находился, например, в первую половину 1982 г. и в течение почти всего 1987 г. Это же состояние было довольно обычно для вулкана в конце 60-х–начале 70-х годов. Лавы этих извержений с больших расстояний выглядели темно-серыми. Для них характерна преимущественно закрытая пористость с порами неправильной формы, достигавшими размеров 2–3 мм. Пировойлочные текстуры практически отсутствуют. Их зачаточные формы прослеживались внутри породы в виде зон с повышенной концентрацией пористости. Размеры этих зон достигали первых сантиметров, а в их центральных частях соединявшиеся поры образовывали двухфазную структуру взаимопроникновения “расплав–летучие”, аналогичную пировойлочным текстурам. Следует заметить, что подразделение извержений Безымянного на две вышеописанные группы весьма условно. Их, скорее, следует рассматривать в качестве крайних членов в ряду промежуточных форм.

В конечном счете, все разнообразие характера извержений Безымянного определяется, на мой взгляд, единственным фактором – режимом расширения летучих. Если извержения первой группы соответствуют лавинообразной дегазации ювенильного материала, то характер извержений второй группы определяется сравнительно спокойным расширением летучих внутри (в пределах) ювенильного материала.

Что касается механизма отделения летучих, то ближе всего, по нашему мнению, соответствует действительности модель, предложенная М.А. Алиди-

бирковым (1987) для процессов “взрывного” газоотделения на основе наблюдений за извержением Безымянного летом 1985 г. и изучения его последствий. Модель предполагает наличие сильновязкого или затвердевшего магматического расплава, содержащего поры, заполненные газом с некоторым избыточным давлением. Освобождение энергии сжатого газа происходит при условии декомпрессии ювенильного материала и развивается в виде волны дробления, распространяющейся вглубь газированного вязкого расплава. При разрушении межпоровых перегородок в верхнем слое сжатый газ расширяется до давления окружающей среды. При этом и сам газ, и захваченные им продукты дробления приобретают определенное ускорение. Снижение давления у вновь образованной поверхности приводит к возникновению перепада давления в следующем слое, который также начинает разрушаться.

Таким образом, реализуется послыйный отрыв. Поверхность, разделяющая не разрушенную систему газ–магма и смесь газа и частиц раздробленной магмы и называемая М.А. Алидибирковым фронтом волны дробления, будет двигаться вглубь системы с некоторой конечной скоростью. При этом во время отделения летучих в канале вулкана не происходит формирование газового объема, имеющего значительное давление, а, напротив, идет сравнительно медленное освобождение запасенной энергии. Скорость распространения волны дробления довольно низка и сопоставима, скорее, с процессом горения, чем с детонацией. Хотя предложенная М.А. Алидибирковым модель довольно близко соответствует действительности, наблюдения автора этих строк показывают, что она нуждается в некоторых уточнениях. Прежде всего это касается условий развития декомпрессии. Для выполнения условия граничной декомпрессии достаточно заложения трещины в объеме сильновязкого и газонасыщенного ювенильного материала. Перпендикулярно поверхности закладывающихся трещин и движется фронт волны дробления.

В плане изучения процесса дегазации ювенильного материала большой интерес представляет анализ трещиноватости в крупных (десятки кубических метров) глыбах андезита, часто встречающихся в отложениях пирокластических потоков Безымянного. Ювенильность материала этих глыб диагностируется овальной или каплевидной формой, текстурами смятия, пирокластическим выветриванием и большим количеством контракционных трещин, в различных направлениях рассекающих глыбу перпендикулярно поверхности. Максимальная ширина этих трещин, как правило, не превышает 1 см, стенки сравнительно прямые и гладкие. Встречаясь у центра глыбы, эти трещины нередко рассекают глыбу на остроугольные блоки. Спустя несколько недель после извержения подобные глыбы часто полностью разрушаются, превращаясь в хаотический развал обломков.

Однако наряду с контракционными трещинами в крупных глыбах ювенильного андезита встречается отличный вид трещиноватости, имеющий непосредственное отношение к процессу дегазации ювенильного материала. В отличие от контракционных, эти трещины (назовем их автоэксплозивными)

встречаются в наиболее крупных глыбах ювенильного андезита в меньшем количестве. Однако их ширина в приповерхностной части глыб нередко достигает нескольких десятков сантиметров. Как и контракционные трещины, автоэксплозивные ориентированы к центру глыбы, но, по мере приближения к внутренним частям, часто появляются признаки разделения главной трещины на ряд более мелких субпараллельных с образованием древоподобной структуры, вершина которой ориентирована к центру глыбы.

Однако наиболее существенным различием автоэксплозивных трещин является повсеместное распространение по их стенкам пировойлочных текстур. Характерна четко выраженная тенденция увеличения пористости андезита по направлению к осевой плоскости трещины. В поперечном разрезе на протяжении 10–15 см прослеживается постепенный переход от обычного мелкопористого андезита к предельным по пористости представителям пировойлочных текстур. Характер и масштабы автоэксплозивных трещин свидетельствуют о том, что они образуются уже после прекращения движения глыбы, так как в противном случае неизбежно произошло бы разрушение последней. К концу первого десятилетия XXI века в автоэксплозивных трещинах глыб ювенильного андезита возросла длина “волос Пеле”, иглопочки которых в отдельных трещинах достигали 2 см.

Автоэксплозивная трещиноватость в крупноглыбовом ювенильном материале пирокластических потоков Безымянного наглядно демонстрирует, что не только условие граничной декомпрессии может реализоваться по трещинам внутри газированного и вязкого ювенильного материала, но и сами ветвящиеся декомпрессионные трещины могут спонтанно формироваться под воздействием энергии сжатых газов.

С учетом сказанного в деятельности Безымянного можно выделить четыре типа процессов газоотделения и освобождения энергии сжатых газов. Во-первых, дегазация ювенильного материала происходит за счет миграции летучих по долгоживущим зонам повышенной трещиноватости в постройке вулкана. Непрерывное газоотделение по этим зонам обеспечивает устойчивый фон умеренной и сильной фумарольной деятельности вулкана как в спокойном состоянии, так и во время извержений. Вторую разновидность процессов дегазации и освобождения энергии сжатых газов представляет выделение и спокойное расширение летучих внутри магмы, ведущие к общему расширению объема системы и, как следствие – к затяжным и сравнительно спокойным экструзивным, экструзивно-эффузивным или эффузивным извержениям.

Третий тип дегазационных процессов представляет автоэксплозивность, т.е. лавинообразная дегазация ювенильного материала по автоэксплозивным (декомпрессионным) трещинам. Этот тип газоотделения соответствует более высокому уровню активности вулкана. Высокое давление летучих обуславливает заложение самой трещины или даже целой системы ветвящихся трещин, распространяющихся вглубь газированного и вязкого ювенильного материала. Вдоль поверхности этих трещин происходит своего рода “вскипа-

ние” ювенильного материала, что можно рассматривать в соответствие с моделью М.А. Алидибирова, как распространение от поверхности трещин вглубь ювенильного материала фронта волны дробления. Расширяющийся по трещинам газ с захваченными частицами дробления выносится на поверхность в виде газопепловых выбросов.

Автоэксплозивная дегазация может быть как эпизодической (дискретной), так и практически непрерывной. Первый вариант характерен для ранних этапов формирования купола Нового, когда над его постройкой периодически формировались грибообразные газопепловые выбросы. Источником их формирования нередко служила вся вершинная часть купола Нового. После подобных выбросов вершина купола оставалась практически в неизменном состоянии, лишь в некоторых частях вершины образовывались воронкообразные углубления, возникавшие, скорее всего, в районе выхода на поверхность наиболее крупных трещин как результат пирокластической эрозии и последующего осыпания в устье трещины обломочного материала.

Второй, практически непрерывный, вариант автоэксплозивной дегазации ювенильного материала характерен для кульминационных стадий бурных эксплозивно-эффузивных извержений вулкана в 80-е годы. В этом случае быстро выжимающийся вязкий и газонасыщенный ювенильный материал в зоне выхода на поверхность практически непрерывно рассекался многочисленными автоэксплозивными трещинами, а бурно выделяющаяся газопепловая взвесь формировала над вершиной вулкана эруптивную колонну.

Особую роль в процессе извержений Безымянного играет четвертый тип процессов дегазации ювенильного материала – спровоцированная эксплозивность. Этот тип представлен процессами газоотделения, протекающими в условиях дополнительных механических воздействий (гравитационно-разгрузочных и ударно-механических). Диапазон этих процессов чрезвычайно широк: от слабых камнепадов холодных и практически дегазированных обломков, при механическом дроблении которых освобождаются остатки содержащихся в них летучих, через процессы формирования автоэксплозивных лавин и пирокластических потоков к мощным направленным эксплозивным извержениям, разрушающим значительные части постройки вулкана (извержения 1956 и 1985 гг.). Во всех этих случаях разрушающий эффект энергии сжатых газов дополнялся и усиливался внешним воздействием на породу, в результате чего происходило близодновременное образование сразу большого числа декомпрессионных (автоэксплозивных) трещин по всему объему вещества, подвергнувшемуся дополнительному механическому воздействию. Наибольшего размаха эти процессы достигали в тех случаях, когда происходило гравитационное соскальзывание с одновременным ударно-механическим (и автоэксплозивным) дроблением значительной части постройки вулкана.

Соотношения между четырьмя перечисленными выше типами дегазации ювенильного материала различны на разных стадиях активности вулкана. В состоянии покоя, как уже отмечалось, происходит лишь миграция летучих по

долгоживущим зонам повышенной трещиноватости, внешне проявляющаяся в фумарольной деятельности вулкана. В процессе затяжных экструзивных, экструзивно-эффузивных или эффузивных извержений этот тип дегазации дополняется спокойным расширением летучих в пределах ювенильного материала и слабой спровоцированной эксплозивностью в процессе формирования обвальных лавин.

Эти же типы дегазации доминируют на начальных и заключительных стадиях извержений с четко выраженной эксплозивно-эффузивной (на ранних этапах исторического цикла активности вулкана – эксплозивно-экструзивной) кульминацией. По мере приближения к этой кульминации одновременно с ускорением поступления на поверхность ювенильного материала, скорее всего, происходит усиление расширения во внутривулкановом пространстве блоков ювенильного материала. Наряду с этим появляются и усиливаются процессы автоэксплозивной дегазации по спонтанно закладывающимся трещинам. В ходе обвалов усиливаются и процессы эксплозивности, спровоцированной внешним ударно-механическим или гравитационно-разгрузочным воздействием. Если при этом часть постройки вулкана оказывается в неустойчивом положении и разрушается, то спровоцированная эксплозивность становится доминирующим типом дегазации ювенильного материала, обуславливая наиболее мощные извержения вулкана.

В целом развитие извержений с четко выраженной кульминацией соответствует лавинообразному предкульминационному усилению и посткульминационному ослаблению процессов дегазации ювенильного материала. Этот своеобразный газовый разряд происходит за счет летучих, находящихся под большим давлением, но рассеянных в порах близповерхностной части магматического канала. Не исключено, что в процессе этого разряда происходят дополнительное увеличение газонасыщенности ювенильного материала и увеличение энергии сжатого в порах газа за счет дополнительного выделения летучих непосредственно из расплава.

Газовый фактор в изменчивости фациального состава вулканитов

Вполне естественно, что газовый фактор, определяющий развитие эруптивного процесса в целом, находит свое отражение в фациальном составе образующихся в ходе эруптивного процесса вулканитов. Что касается массивных фаций, то в наблюдениях постепенно активизирующегося вулкана неоднократно фиксировались переходы, в которых локальные деформации постройки вулкана трансформировались в экструзии, которые в свою очередь, по мере нарастания газонасыщенности, преобразовывались в лавовые вздутия, материал которых начинал стекать вниз по склону, образуя лавовые потоки. И наоборот, в ходе затухания извержения вершинные части свежеизлитых лавовых потоков нередко деформировались затухающими импульсами экструзивного процесса.

Наиболее наглядна роль газового фактора в образовании кластических

фаций. Давление расширяющихся вулканических газов обуславливает образование кластического материала. Особенно ярко это явление иллюстрируют часто встречающиеся в составе отложений пирокластических потоков крупные автоэксплозивные глыбы, представленные ювенильным материалом с четко выраженными тещинами газоотделения. При этом есть все основания считать, что автоэксплозивная дегазация этих глыб нередко завершалась уже после остановки пирокластических потоков.

Очень существенна роль газового фактора в формировании фациального состава пирокластических потоков и отложений направленных эксплозивных извержений (рис. 1–2). Наблюдения показывают, что под воздействием газового фактора процесс движения потоков раскаленной пирокластики имеет ряд особенностей, которые, как правило, не учитываются в попытках реконструкции развития этих процессов по результирующим отложениям. Эти особенности свойственны и автоэксплозивным лавинам, и пирокластическим потокам, но за счет масштабного эффекта более отчетливо прослеживаются в ходе направленных пароксизмальных извержений, таких, как извержения 30 июня–1 июля 1985 г. и, тем более, 30 марта 1956 г.

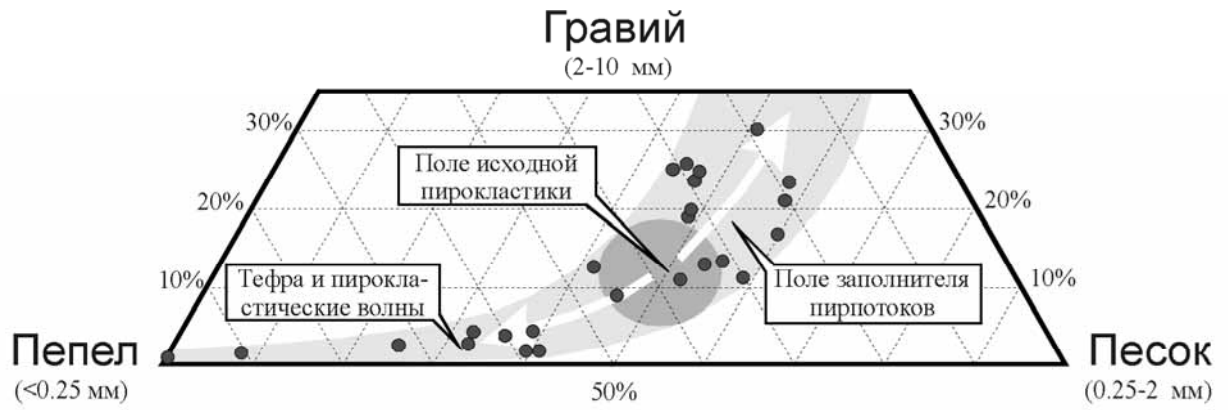
Одной из наиболее существенных особенностей движения потоков раскаленной пирокластики является уже упоминавшаяся дифференциация движущейся пирокластики по гранулометрическому составу и скорости движения. При движении вдоль поверхности земли более легкая пирокластика обладает большей подвижностью, большей способностью к ускорению под воздействием расширяющихся газов, и поэтому в виде так называемых пирокластических волн обгоняет фронт основного пирокластического потока. И лишь во втором эшелоне этого потока постепенно подтягивается крупноглыбовый материал, включая основную массу пород оползневой лавины. Близкую картину развития процесса автор наблюдал сквозь прозрачную завесу раскаленной пирокластики во время направленного взрыва влк. Безымянный в ночь на 1 июля 1985 г.

Так как различные по составу и скорости движения части потока раскаленной пирокластики оказываются в некоторой удаленной от вулкана точке в разное время, то образующийся в этой точке разрез в значительной степени отражает эволюцию пирокластического материала в процессе движения. И чем больше путь, пройденный потоком пирокластики от центра извержения, тем ярче в образуемых им отложениях отражена общая тенденция к разделению пирокластического материала по скорости и гранулометрическому составу.

Вторая особенность движения потоков раскаленной пирокластики – непрерывная субвертикальная дифференциация материала в движущемся потоке¹.

¹ Представления о субвертикальной гравитационной дифференциации в движущихся пирокластических потоках в последние годы получили развитие в работах О.А. Гириной (1990, 1993, 1996, 1997, 1998, 2001, 2004, 2010). Однако субгоризонтальная скоростная дифференциация движущейся пирокластики в этих работах по-прежнему не учитывается.

А. Извержение 30 июня - 1 июля 1985 г.



В. Извержение 17 декабря 1986 г.

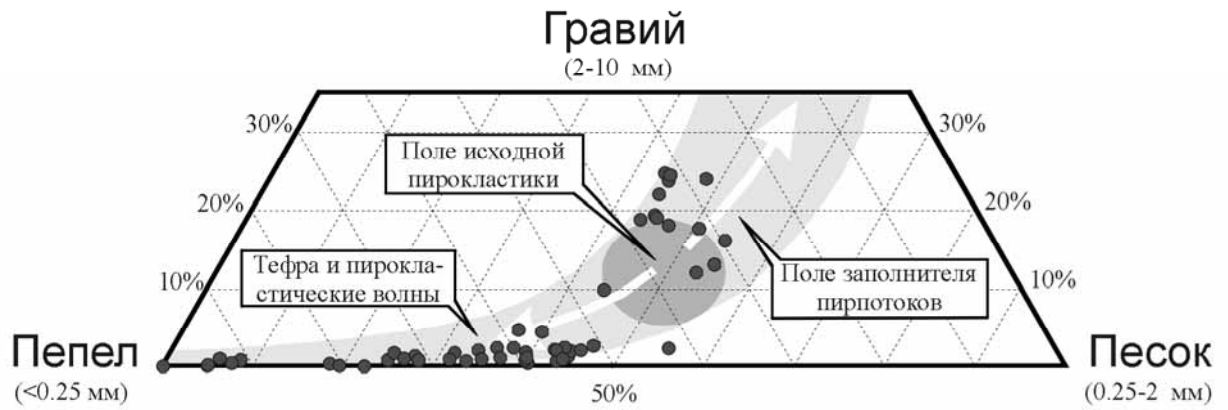


Рис. 1. Эволюция гранулометрического состава пирокластических и тефровых отложений по мере удаления от центра извержения.

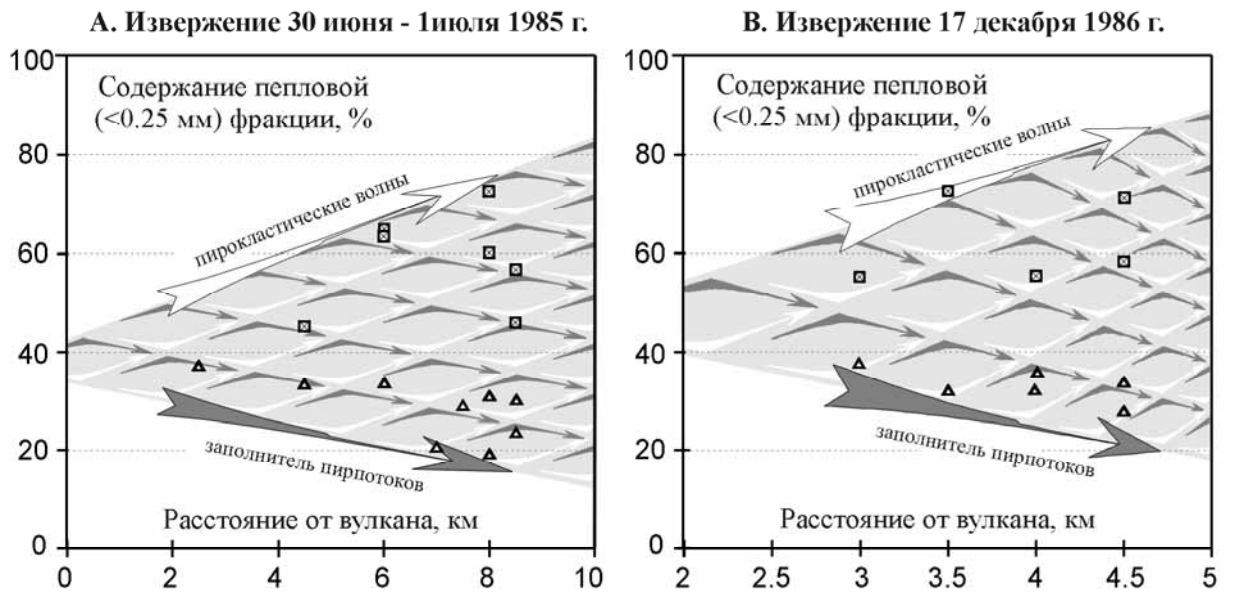


Рис. 2. Изменение содержания пепловой фракции в пирокластических отложениях по мере увеличения расстояния от центра извержения.

С одной стороны, под воздействием силы тяжести, происходит непрерывное перемещение более тяжелых обломков и частиц в нижние части потока. С другой, навстречу этим обломкам за счет энергии расширяющихся раскаленных газов (в том числе и вновь образующихся за счет явления автоэксплозивности) происходит непрерывный вынос более легких частиц. Эти частицы, оказываясь над потоком, попадают под воздействие субгоризонтальной дифференциации по скоростям (см. выше), ускоряются, обгоняют фронт самого потока и, оказываясь в области аккумуляции раньше, залегают в разрезе под самим пирокластическим потоком. Эти отложения обычно отождествляются с приземной пирокластической волной (ground surge), впервые выделенной Спарксом и Уолкером (1973). Но и эти отложения, и подстилающая их поверхность могут быть глубоко эродированы подтягивающимся во вторых эшелонах грубообломочным материалом. Обычно принято считать, что, несмотря на непрерывный обмен между пирокластическим потоком и сопровождающей его пепловой тучей, между ними очень быстро образуется такая же четкая граница, как между кипящей водой и находящимся над нею паром. Пирокластический поток, как правило, рассматривается как поток псевдожидкости. Это удобная для применения законов гидродинамики модель, но ее абсолютизация была бы грубой ошибкой. Пирокластический поток – это поток дробленого материала, угловатых частиц, которые соприкасаются друг с другом на довольно небольшой площади. Он отличается от воды тем, что у воды есть смачивание и поверхностное натяжение. В результате даже при кипении у воды образуется пленка поверхностного натяжения. Это та граница, которая и разделяет газ и жидкость. Если же через пирокластический поток проходит газ, то эта граница тут же теряется. Точки соприкосновения между частицами исчезают, и частицы оказываются как бы подвешенными в газе.

В связи с непрерывной и интенсивной субвертикальной дифференциацией движущегося пирокластического материала следует подчеркнуть, что в потоке раскаленной пирокластики четкая граница между более тяжелой его нижней частью, под которой обычно понимается собственно пирокластический поток, и более легкой верхней, обычно именуемой сопровождающей пирокластический поток пепловой тучей, отсутствует. Поэтому имеет смысл говорить лишь о более или менее выраженном субвертикальном градиенте потока раскаленной пирокластики по плотности. В начале движения пирокластики этот градиент минимален и постепенно возрастает в процессе эволюции потока с течением времени, и лишь спустя достаточно длительное время после остановки потока этот градиент достигает максимума и локализуется в виде субгоризонтальной поверхности, разделяющей основную массу пирокластического материала и находящееся над ним пепловое облако. Отложения последнего обычно отождествляются с волной пеплового облака (ash cloud surge) пирокластического потока.

Еще одна особенность движения потока раскаленной пирокластики является его специфическая реакция на рельеф, выражающаяся в том, что более тяжелые части потока движутся в полном соответствии с рельефом местности, а более легкие этот рельеф игнорируют, причем возможность движения

как с учетом рельефа, так и при его игнорировании реализуется практически одновременно (рис. 3). Это обусловлено, во-первых, очень высоким верхним уровнем (границей) распространения раскаленной пироклаستيку в движущихся потоках, вертикальные параметры которых на несколько порядков превосходят мощности образующихся после их остановки отложений пироклаستيку, а во-вторых – наличием упомянутого выше субвертикального градиента распределения пироклаستيку в движущемся потоке.

Наиболее тяжелые части потока испытывают тенденцию к движению по рельефу, в то время как движущаяся впереди и над основной массой потока более легкая пирокластикка может как перехлестывать через встречающиеся препятствия, так и проноситься над ними, продолжая прямолинейное движение. В случае движения потока раскаленной пироклаستيку вкрест простирающихся основных форм рельефа, встречающиеся на его пути препятствия срываются как гигантский гравитационный сепаратор, разделяя поток на отклоняющуюся по рельефу сравнительно более тяжелую и продолжающую двигаться прямолинейно более легкую части. Обе эти части продолжают двигаться самостоятельно, и каждая из них обладает всеми перечисленными выше особенностями, включая непрерывную плотностную и скоростную дифференциацию, а также возможность повторного (многократного) деления каждой из них встречающимися на пути препятствиями. Как из отклонившейся по рельефу более тяжелой части потока сразу же начинается выделение более легкой и быстрой пироклаستيку, так и в процессе движения более легкой части потока в ее основании начинает сразу же аккумулироваться более грубообломочный материал. Именно последнее обстоятельство, скорее всего, в 1956 г. стало причиной формирования отложений самостоятельных пирокластических потоков, не имеющих видимой связи с отложениями главного потока (Горшков, 1962).

Последней из наиболее существенных особенностей движения потоков раскаленной пироклаستيку является наличие достаточно длительного интервала времени, в течение которого продолжается извержение (истечение) потока раскаленной пироклаستيку с общей тенденцией к уменьшению общего количества извергающегося материала, увеличению в нем доли ювенильной составляющей и уменьшению газонасыщенности последней. Чаще всего эта тенденция реализуется через последовательность затухающих пульсаций, а отложения финальных порций раскаленной пироклаستيку все больше приобретают характерный облик пемзовых пирокластических потоков, резко контрастируя с первичными отложениями катастрофического потока раскаленной пироклаستيку.

Газовый фактор в изменчивости минерального состава вулканитов

Неравномерность развития дегазационных процессов, выражающаяся в чередовании затяжных экструзивно-эффузивных извержений вулкана с периодами его бурной эксплозивной деятельности, находит отражение в изменчивости минерального состава как в ходе всего цикла исторических извержений вулкана, так в отдельных импульсах его активности.

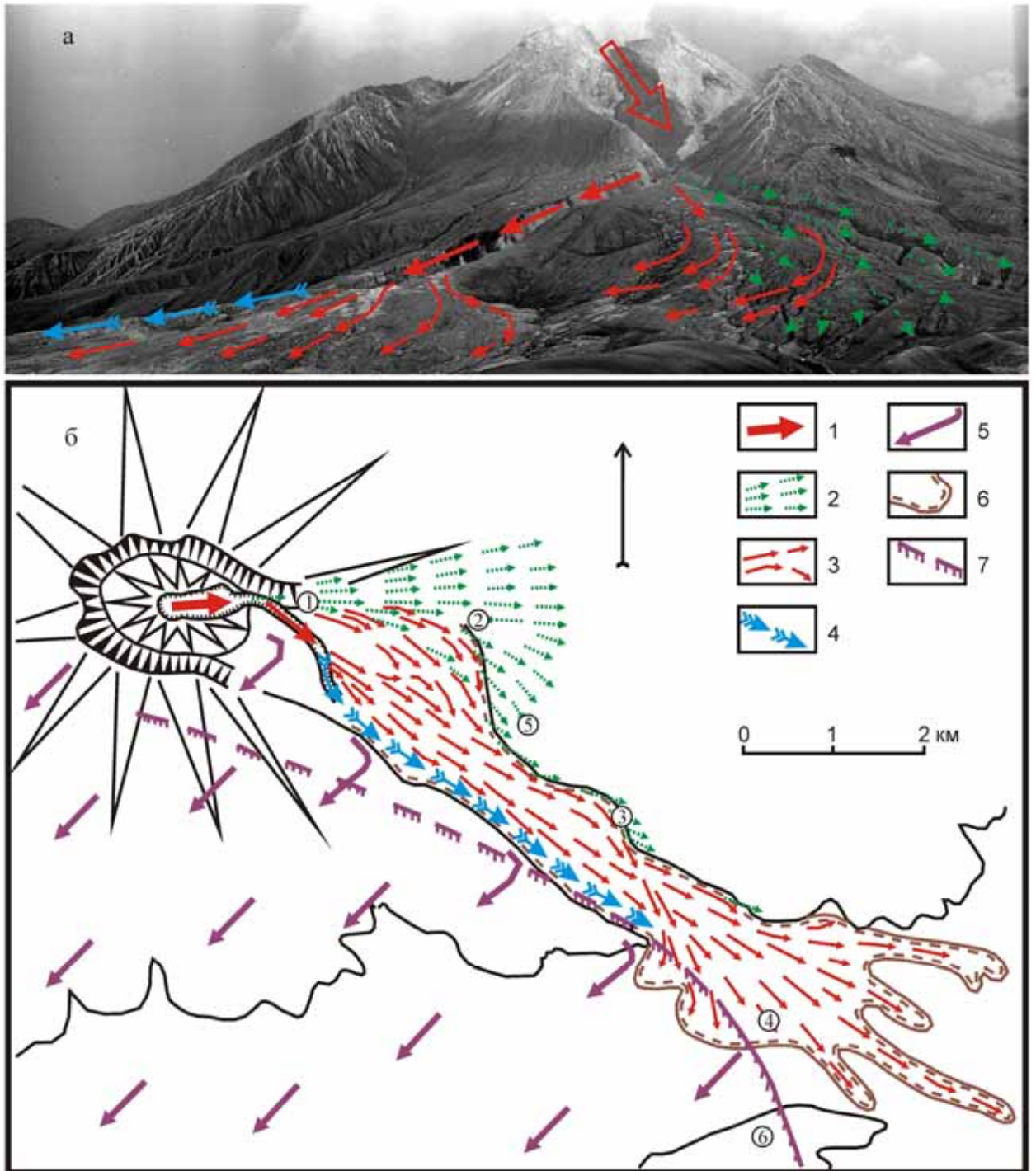


Рис. 3. Формирование отложений пироклаستيки 30 июня–1 июля 1985 г.

1 – начальное направление сверхмощного истечения раскаленной пироклаستيки, 2–4 траектории движения соответственно наиболее легкой пироклаستيки, пирокластических потоков, обогащенных легкой фракцией, и наиболее “тяжелого” потока, транспортировавшего большую часть обвално-глыбового материала, 5 – направление сноса пепловой тучи извержения, 6 – область отложения материала потоков раскаленной пироклаستيки, 7 – граница области выпадения гравитационных лапилли; цифры в кружках: 1 – положение разреза, приведенного на рис. 153 (здесь и далее в условных обозначениях нумерация рисунков по тексту диссертации); 2 – место нахождения разрушенных извержением экспедиционных домиков (см. рис. 84); 3 – точка съемки рис. 154; 4 – положение разреза пирокластических отложений в Ключе Тундровом (рис. 155); 5 – точка обзора для рис. 152а; 6 – наблюдательный пункт за развитием извержения.

В пеплах, предшествовавших катастрофическому эксплозивному извержению вулкана 30 марта 1956 г., среди темноцветных минералов доминировал ромбический пироксен в виде неправильных зерен и мелких обломков кристаллов. Роговая обманка отмечалась лишь в очень небольших количествах в виде обломков кристаллов изометрической или вытянутой формы. В пеплах извержения 30 марта 1956 г. роговая обманка и ромбический пироксен встречались примерно в одинаковых количествах, а в андезитах пирокластического потока этого извержения роговая обманка была уже основным темноцветным минералом. Содержание роговой обманки достигло максимума в породах 1957 г. (Ермаков, 1974) и представлена она была не зеленой, а бурой разновидностью. Небольшие призмы гиперстена в этих образцах имели покрасневшие края, и наблюдалось реакционное замещение пироксена роговой обманкой, а часть микролитов гиперстена была замещена магнетитом (Горшков, Богоявленская, 1961; Ермаков, 1974).

В ходе последующих извержений роговообманковые андезиты сменились роговообманково-пироксеновыми, а затем – дупироксеновыми. Вкрапленники роговой обманки практически исчезли уже в лавах извержения 1961 г., подвергшись интенсивной гранулярной диссоциации с образованием агрегатов Pl, Px и Mt. Роговую обманку в качестве главного темноцветного породообразующего минерала в это время сменил ромбический пироксен. Однако роговая обманка в виде единичных кристаллов, в значительной степени подвергнувшихся реакционной переработке, продолжала встречаться в породах Безымянного все последующие годы. Характерно, что в продуктах исторических извержений во многих случаях микролиты основной массы и субфенокристаллы пироксена представлены только гиперстеном, тогда как моноклинный пироксен встречается исключительно в фенокристаллах в сопоставимых с гиперстеном количествах – или представлен крупными одиночными кристаллами или гломеропорфиловыми сростками, достигающими размеров 4 мм.

Наряду с изменениями минерального состава в ходе исторических извержений были зарегистрированы периодически повторяющиеся изменения структуры пород. В первые годы после извержения 30 марта 1956 г. произошло увеличение микролитов основной массы: переполненное плохо развитыми кристаллитами стекло андезитов 1956–1957 гг. сменилось чистым стеклом в андезитах 1961 г. и последующих лет. В первое десятилетие исторических извержений вулкана увеличилась степень кристалличности лав. Количество основной массы (микролитов и стекла) резко снизилось от 65% в 1956 г. до 34–40% в последующие годы. Наиболее характерная особенность лав этого периода – появление субфенокристаллов плагиоклаза и пироксена второй генерации. За 8–10 лет их количество, постоянно возрастая, достигло 40% общего объема породы. Именно за счет второго поколения вкрапленников росла кристалличность лав, количество фенокристаллов плагиоклаза и пироксена I генерации изменялось мало. В 1965 г. в процессе бурного эксплозивного извержения произошло скачкообразное уменьшение кристалличности лав. В последующие го-

ды, как и в предыдущее десятилетие, степень кристалличности лав стала быстро возрастать. Одновременно субфенокристаллы II генерации достигли размеров вкрапленников I генерации. С 1977 г. для вулкана вновь стали характерны мощные эксплозивные извержения, в результате чего произошло очередное уменьшение степени кристалличности ювенильного материал.

В процессе единичного извержения структура пород также не остается постоянной. В частности, зарегистрированы (Дубик, Меняйлов, 1969) факты снижения количества вкрапленников I генерации (фенокристаллов) на фоне возрастания количества стекла и вкрапленников II генерации (субфенокристаллов). Также отмечено (Богоявленская и др., 1979) общее уменьшение раскристаллизованности основной массы в более поздних продуктах извержения. Не остается постоянным и минеральный состав: для более поздних продуктов в извержении 1965 г. (Дубик, Меняйлов, 1969) характерно появление в основной массе микролитов апатита, достигавших 100–150 мкм.

В ходе проведенного Ю.М. Дубиком и О.Н. Волынцом (Дубик, Волынец, 1972) большого статистического исследования плагиоклазов установлено, что средние составы P1 I и P1 II генерации различаются существенно – на 17–19% An, причем это значение разницы выдерживается для лав всех изученных извержений. Изменение средних составов P1 по генерациям носит следующий характер: высокое значение An в лавах ранних извержений (1956–1957 гг.) сменяется минимальным в лавах извержения 1961 г., а затем снова увеличивается в лавах более поздних извержений. Фактически имеет место параллельное изменение составов обеих генераций вкрапленников, что прослеживается даже в ходе отдельного извержения – в извержении 1965 г. составы P1 обеих генераций параллельно изменялись от более кальциевых в ранних продуктах извержения к менее кальциевым – в поздних.

При исследовании раскристаллизованности пород складывалось впечатление (Богоявленская, Кирсанов, 1981; Ермаков, 1974), что в ходе кристаллизации имеющиеся в породе субфенокристаллы достигают размеров фенокристаллов и отождествляются с последними. Микролиты, вырастая, становятся субфенокристаллами, а увеличивающиеся в размерах кристаллиты становятся микролитами. Однако диагностируемые на качественном и количественном (рис. 4) уровне разрывы в распределении минеральной фазы по размерам при этом сохранялись. При этом, как уже упоминалось, неоднократно отмечалась четкая корреляция между импульсами эксплозивной активности вулкана (газовым фактором) и изменениями распределения минеральной фазы по размерам.

Корреляция с эксплозивной деятельностью прослеживается и в детальном изучении структуры плагиоклазов современными методами. В частности, в продуктах извержений последних лет, по данным (Shcherbakov et al., 2010), повторяющаяся зональность плагиоклазов по структуре и составу имеет довольно закономерный характер. По направлению от ядра кристалла к его краю небольшие колебания состава плагиоклаза в диапазоне An_{50–60} прерываются структурами плавления и коррозии с одновременным резким по-

вышением доли анортитовой составляющей (вплоть до An_{85}) и последующим постепенным ее снижением до прежнего уровня.

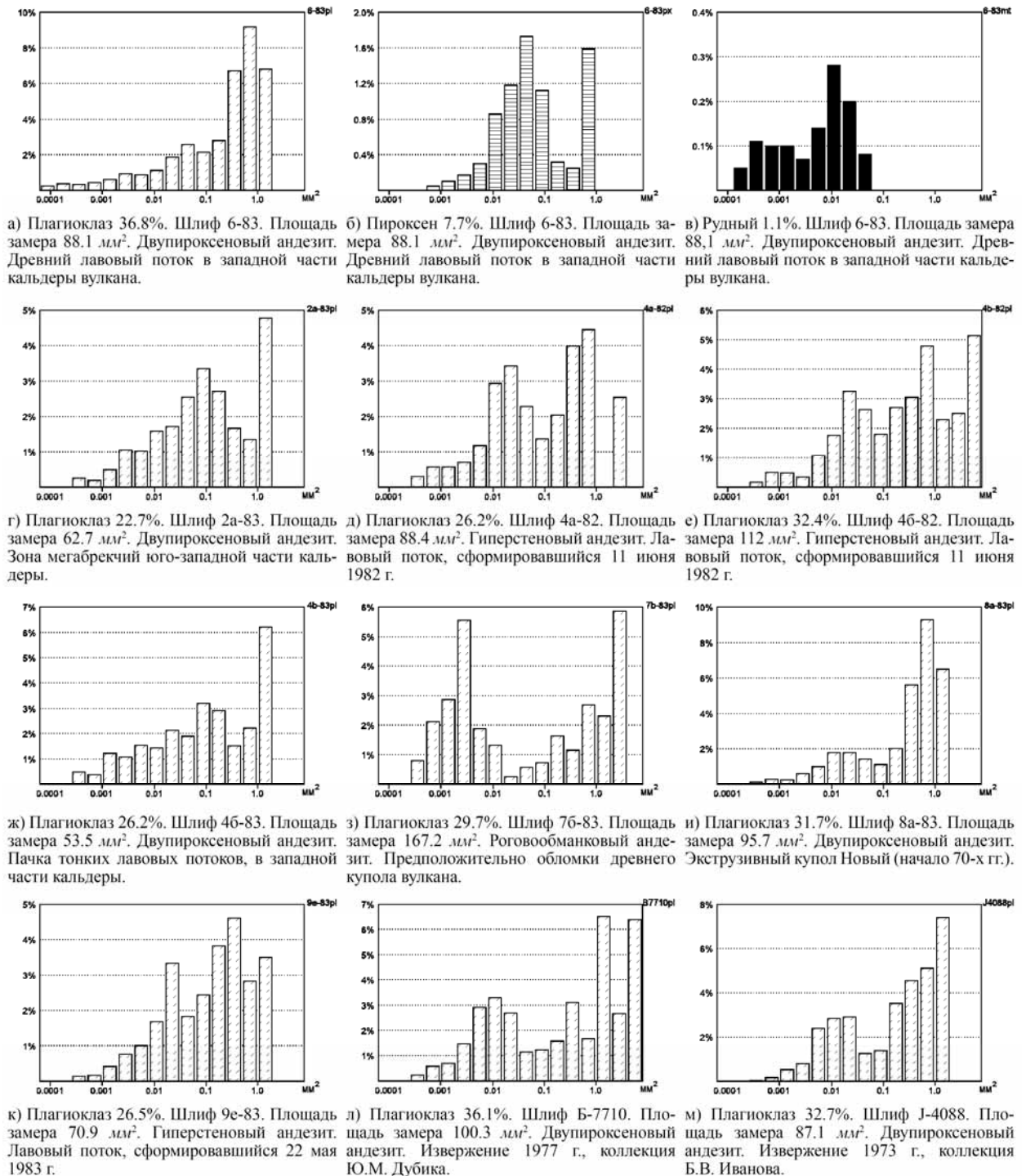


Рис. 4. Серийно-порфировые структуры пород Безымянного.

По оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложена площадь сечений ($мм^2$), по оси ординат – их содержание в шлифе.

Газовый фактор в изменчивости химического состава вулканитов

С течением времени все отчетливее просматривается эволюция химического состава вулканитов Безымянного. Общий тренд эволюции по умень-

шению содержания диоксида кремния в продуктах извержений может быть представлен формулой: $X_{\text{SiO}_2} = A \times (t - t_0) + X_0$, где $A = 0.077\%/год$, $X_0 = 59.788\%$ – расчетное содержание SiO_2 на момент начала исторических извержений (25 октября 1955 г. – t_0), а разность $(t - t_0)$ выражена в годах.

Наряду с общей тенденцией к повышению основности извергаемого в ходе исторических извержений материала имеются признаки повышения содержаний SiO_2 на самых ранних этапах исторического цикла активности. Имеются данные по составу пеплов, отобранных на одинаковом расстоянии от вулкана (42.5 км, пос. Ключи). Последнее обстоятельство позволяет в первом приближении исключить влияние “эоловой” дифференциации и, тем самым, вычленив общую тенденцию изменения содержания SiO_2 в продуктах извержений начального этапа. Количественная оценка этой тенденции показывает, что на начальном этапе исторических извержений содержание диоксида кремния в пеплах, собранных в пос. Ключи, изменялось в соответствии с зависимостью: $X_{\text{SiO}_2} = A \times (t - t_0) + X_0$, где $A = 0.428\%/год$, $X_0 = 59.063\%$ – расчетное содержание SiO_2 на момент начала исторических извержений (25 октября 1955 г. – t_0). При этом общее расчетное смещение содержания SiO_2 в пеплах за период 25 октября 1955 г. по 26 марта 1961 г. составило 2.317%, что почти в 2.5 раза выше стандартного отклонения линейной регрессии (0.953%). Таким образом, скорость этого начального раскисления продуктов исторических извержений более чем в 5 раз превышала скорость последующего повышения их основности.

Что касается изменения химического состава продуктов отдельных извержений, то ситуация здесь весьма своеобразная. Наличие изменений химического состава отмечалось, в частности, в работе [Дубик, Меняйлов, 1969]. Однако в опробовании продуктов отдельных извержений разброс значений по содержанию диоксида кремния достигает 4%. В то же самое время разброс результатов химических анализов лавовых потоков древних извержений на порядки меньше: 0.15% SiO_2 (анализы 2–4 в табл. 5.1 из [Иванов, 2008]), 0.03% SiO_2 (анализы 13–15, там же), 0.23% SiO_2 (анализы 90–92, там же). По мнению автора этих строк, столь существенный разброс в результатах анализов ювенильного материала современных извержений соответствует резко неоднородному поведению газов в формировании различных фаций изверженного материала. Так, по данным [Гирина, 2010] наиболее основными являются обломки лавы из пирокластических потоков, к ним близки составы заполнителей пирокластических потоков – 56.72 вес. % SiO_2 (33 образца) и 56.68 вес. % (16), соответственно, далее – заполнители пирокластических волн – 57.18 вес. % (10). Наиболее кислыми являются пеплы облаков потоков – 60.61 вес. % (8). Как можно видеть, имеется четкая корреляция содержания диоксида кремния с активностью газовой фазы при формировании соответствующих фаций.

Изменчивость газового состава в современной деятельности Безымянного

Наиболее активно газовый состав Безымянного исследовался на ранних

стадиях цикла его исторических извержений, что во многом определялось доступностью фумарол вулкана для опробования. В ходе этих исследований было установлено, что самые высокотемпературные фумаролы, содержащие наибольшее количество вулканических газов и имеющие максимально высокую минерализацию газовых конденсатов, приурочены к активным блокам вулкана. Температура газов, выходящих по трещинам растущих обелисков, нередко достигает 700°C , а внутри этих трещин иногда даже днем можно наблюдать ярко-красное свечение. Интенсивная фумарольная деятельность наблюдается и по периметру растущих экструзивных блоков, на более стабильных участках вершины вулкана – в зонах повышенной трещиноватости, в различных направлениях рассекающих постройку купола Нового. Температура газовых выходов по этим трещинам достигает $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$. Обычны фумарольные площадки с температурой газовых выходов $100\text{--}300^{\circ}\text{C}$. Поверхность этих площадок покрыта пеплом, сцементированным возгонами сульфатов, опала и серы. На склонах купола интенсивность фумарольной деятельности быстро падает от вершины к основанию, где в развалах глыб отмечаются лишь редкие пароводяные выделения с температурой, не превышающей 100°C .

В составе фумарольных газов практически всегда доминируют пары воды (H_2O), содержание которых достигает $16\text{--}80\%$. Вторым по значимости компонентом является двуокись углерода (CO_2), затем следуют серные газы (SO_2 , SO_3 , H_2S), галогеноводороды (HCl , HF). В периоды усиления активности вулкана в составе фумарол отмечалось (Иванов и др., 1975; Меняйлов, Никитина, 1966) появление горючих газов (H_2 , CH_4). Наибольшее распространение среди возгонов имеют опал, сера, сульфаты кальция и алюминия, гематит, меньшее – сассолин, фториды и хлориды. К наиболее редким минеральным образованиям среди возгонов следует отнести окись ванадия, афтиталит, миллозивечит, астраханит и эпсомит. Как показывают результаты спектрального анализа, вулканическими газами в больших количествах выносятся редкие элементы, в результате чего содержание многих редких элементов превышает таковое в породах вулкана в десятки и сотни раз.

Газовый состав, минерализация и содержание редких элементов существенно зависят от температуры фумарол и их расположения. Причем по данным Е.К. Серафимовой (1971) температура в этих зависимостях не является определяющим фактором – соотношения газовых компонентов в значительной степени зависят от степени активности тех блоков купола, к которым приурочены фумаролы. Если для стабильных блоков купола характерен резко галоидный состав газовых выделений с большим количеством фтора, то для находящихся в стадии экструзивного роста блоков – резкое преобладание соединений серы ($\text{SO}_3/\text{Cl} = 3.75$). В привершинной части склонов купола в составе вулканических газов доминируют галоиды. Однако ближе к основанию купола на общем фоне резкого снижения концентрированности вулканических газов в газовых выходах роль серы вновь возрастает. В целом это отражает общую тенденцию отделения летучих при остывании лавового материала.

Состав газовых выделений вулкана обладает высокой изменчивостью не только в пространстве, но и во времени. Прежде всего это относится к изменению соотношений между газами группы серы и галогеноводородами по мере нарастания и снижения активности вулкана. В ходе анализа водных вытяжек из пеплов докульминационной стадии извержения 1955–1956 гг. Л.А. Башариной (1960) установлено, что отношение S/Cl стало максимальным во время и непосредственно после кульминационного извержения 30 марта 1956 г., а в последующие годы стало снижаться за счет возрастания доли галогенных газов. В первое десятилетие постпароксизмальной активности вулкана по мере роста купола в газах уменьшалось содержание SO₂, H₂S, CO, CO₂ и увеличивалось HF и HCl. Несомненно, что пароксизмы, происходящие на вулкане, должны сказываться на составе и количестве газовых эманаций, но при редком опробовании фумарол (1–2 раза в год) уловить эти изменения довольно затруднительно (Кирсанова, Кирсанов, 1971). И, тем не менее, в результате многолетних наблюдений исследователи пришли к заключению (Меняйлов, Никитина, 1966; Меняйлов, 1976б), что и в ходе рядовых извержений вулкана нарастание его активности характеризуется увеличением соотношения S/Cl, а спад – уменьшением.

В зависимости от степени активности вулкана менялся состав формирующихся в ходе фумарольной деятельности возгонов. В частности, при посещении купола в спокойном состоянии в апреле 1963 г. исследователями (Меняйлов, Никитина, 1964) обнаружен слой возгонов, состоявших из гипса, хлоридов и фторидов. А 22–23 июля 1964 г. (Меняйлов, Никитина, 1966) непосредственно перед эксплозивной активизацией вулкана поверхность выжимающихся вертикальных обелисков была покрыта парящими трещинами с натеками переплавленной серы зеленовато-желтого цвета; такие же натеки обнаружены и на отдельных глыбах на склонах купола. В прямой зависимости от степени активности вулкана варьирует с течением времени и количество выносимых на поверхность микрокомпонентов. В частности, Е.К. Серафимова (1971) отметила, что число определяемых микрокомпонентов и их концентрации находятся в прямой зависимости от времени постэруптивного цикла, первые высокотемпературные эксгаляции всегда обогащены ими.

Таким образом, все изложенное в первой части работы обосновывает **защищаемое положение: Газовый фактор имеет ключевое значение вулканогенного петрогенеза, определяя форму вулканических извержений, разнообразие и вариации фациального, минерального и химического состава вулканитов, а также синхронную вулканической активности изменчивость состава самих вулканических газов.**

ЧАСТЬ II. ОБОБЩЕНИЯ – ГАЗОВЫЙ ФАКТОР В ЭНДОГЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Как следует из названия, вторая часть работы посвящена анализу изложенного в первой части фактического материала и обобщению с использованием

литературных данных выявленных в ходе этого анализа закономерностей. Часть состоит из трех глав, последовательно наращивающих глубину обобщений: “Динамическая модель вулканического процесса”, “Динамическая модель магматического процесса” и “Дегазационная модель планетарной эволюции”.

Динамическая модель вулканического процесса

Под динамическим моделированием в контексте данной работы понимается построение наиболее общей схемы функционирования магматических систем, включая их зарождение, которая, тем не менее, была бы достаточной как для установления сил, вызывающих зарождение и последующую эволюцию магматических систем, так и для объяснения основных закономерностей развития магматических систем.

Применение системного подхода к изучению развития Безымянного позволило выявить наиболее общие закономерности вулканического процесса: зависимость формы извержений от поведения летучих, полицикличность, признаки саморазвития и саморегуляции, отражение полицикличности вулканического процесса в фаціальном, химическом, минеральном и газовом составах извергающегося материала, эволюции вулканической постройки. На многочисленных примерах было показано, что эти закономерности универсальны и свойственны вулканическому процессу в целом. Из всех перечисленных закономерностей ключевым моментом для понимания сути происходящих процессов, по мнению автора, является тройственная взаимосвязь динамики (силы) извержений, газонасыщенности и кристалличности пород.

Таким образом, качественной моделью вулканического процесса является аналог саморазворачивающейся пружины – саморегулирующийся и самоорганизующийся автоколебательный процесс расширения магматических систем при наличии большого (теоретически – бесконечно большого) набора колебательных частот. Источником динамической активности магматических систем является рассеивание их тепла в окружающее пространство, сама активность возникает за счет выделения из расплава кристаллической и газовой фазы и нарастания внутриматричного давления, а сброс этого давления носит полициклический характер.

Естественно, что полициклическая изменчивость внутриматричного давления накладывает отпечаток и на все процессы, происходящие в магме. Широко известен факт смещения под большим давлением летучих минеральных равновесий в магме в сторону водосодержащих минералов. Для Безымянного это проявляется в реакционных замещениях пироксена роговой обманкой при нарастании давления летучих и переходе от роговообманково-пироксеновых андезитов к пироксеновым – при сбросе давления. Однако еще более ярко, на наш взгляд, полициклическая изменчивость внутриматричного давления отражается в образовании порфириковых и серийно-порфириковых структур вулканических пород (см. рис. 4).

Количественную сторону динамической модели вулканического процес-

са представляет уравнение динамики саморазвивающихся природных процессов (уравнение СРП), первоначально установленное автором для динамики извержений вулкана Безымянного в 80-е годы прошлого века [Малышев, 1995], но, как выяснилось в дальнейших исследованиях, характеризующее широкий класс саморазвивающихся природных процессов. Уравнение СРП представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка: $d^2x/dt^2 = |(dx/dt)^\lambda - (dx/dt)_0^{\lambda/\alpha}|^{\alpha/\lambda}$, где параметр x – любая неубывающая количественная характеристика, естественным образом отражающая развитие процесса; k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность развития процесса соответственно в окрестностях стационарного состояния ($(dx/dt) \approx (dx/dt)_0$) и на значительном от него удалении ($(dx/dt) \gg (dx/dt)_0$ или $(dx/dt) \ll (dx/dt)_0$).

Исходными данными для количественной составляющей динамической модели вулканического процесса послужили эмпирические закономерности, установленные в ходе наблюдений за процессом извержений вулкана Безымянного. Из этих закономерностей прежде всего следует отметить неоднократно упоминавшиеся в предыдущих разделах признаки саморазвития и саморегуляции вулканического процесса в виде прямой и обратной лавинообразности. Для процесса активизации вулкана обычна прямая лавинообразность, т.е. нарастание активности вулкана в зависимости от его текущего состояния – чем больше активизирован вулкан, тем быстрее происходит его активизация. В процессе затухания извержения прослеживается определенная аналогичная, но обратная лавинообразность, отличающаяся от лавинообразности активизации вулкана лишь знаком, – чем ниже уровень активности вулкана, тем медленнее происходит ее снижение.

Эти закономерности, фиксировавшиеся автором этих строк в первые годы наблюдений (1980–1985 гг.) на качественном уровне, в количественном плане могут быть выражены нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка: $dx/dt = B(x - x_0)^\beta$, где x – параметр, характеризующий развитие процесса; x_0 – значение параметра в равновесном состоянии; dx/dt – скорость его изменения, B – коэффициент, β – показатель степени пропорциональности. В ходе последующего изучения динамики извержений Безымянного в 1986–1987 гг. автором была предпринята попытка количественных оценок приращений объема постройки вулкана в процессе извержения. В результате были выявлены гиперболические закономерности нарастания мощности деформационно→экструзивно→эффузивного процесса в преддверии кульминации извержения. Установление этих закономерностей позволило, с одной стороны, успешно предсказать эксплозивно-эффузивную кульминацию извержения 17 декабря 1986 г., а с другой – отрицать возможность подобной кульминации в ходе затяжного экструзивно→эффузивного извержения 1987 г., несмотря на кажущуюся аналогию в развитии событий.

Уравнение СРП дополняет качественную сторону модели вулканического процесса количественной (рис. 5) и позволяет охарактеризовать количественную

сторону полицикличности в виде суперпозиции нескольких уравнений СРП, описывающих саморазвитие системы в разных временных масштабах и соответственно отличающихся друг от друга значениями констант саморазвития.

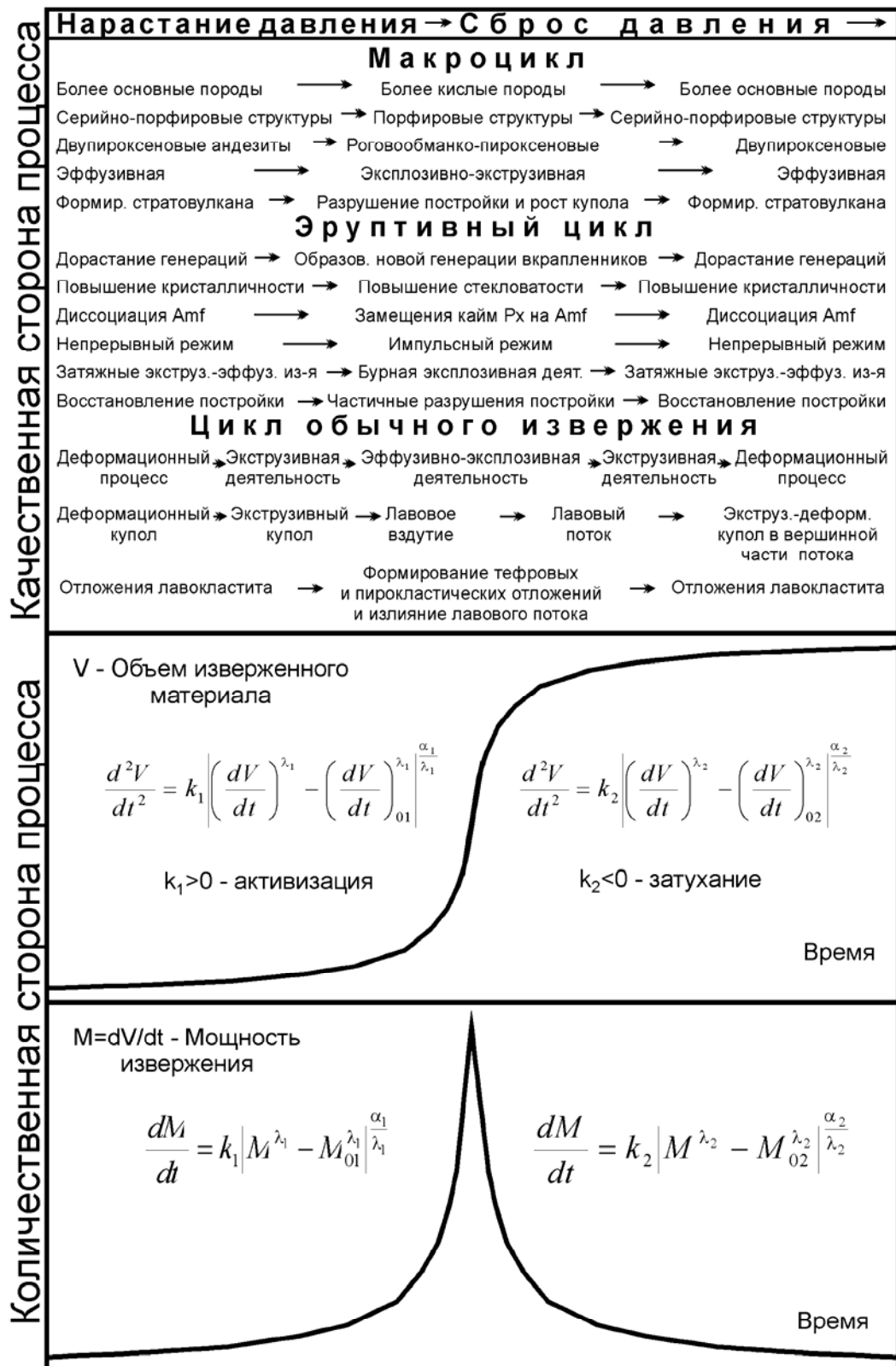


Рис. 5. Взаимосвязь (синхронизация) количественной и качественной сторон динамической модели вулканического процесса.

Динамическая модель магматического процесса

Так как вулканы являются единственным источником информации о закономерностях развития “живых” магматических систем, то все сказанное в предыдущих разделах имеет первостепенное значение для понимания основных закономерностей развития глубинных магматических систем.

На протяжении многих поколений со времен Дж. Поулетт-Скропа, т.е. уже почти двести лет, вулканологи, изучающие процесс извержений, не устают вновь и вновь повторять то, что, пожалуй, лучше всех сказал Ф.А. Перре, наблюдая динамику извержений вулкана Мон-Пеле: *“Газ – это активный агент, и магма является его переносчиком”*. И тем не менее, этот вывод раз за разом отвергается магматической геологией как некий частный приповерхностный случай. Отвергается сама возможность существования в глубинных условиях вещества в газообразном состоянии.

Подобное постоянство обусловлено двумя причинами. Прежде всего, это некорректное использование в эндогенной геологии физических представлений, согласно которым в условиях высоких давлений¹ все различия между физическими свойствами газа и его конденсата исчезают. Как известно, каждый физический закон имеет область своего применения, за пределами которой его использование приводит к серьезным ошибкам. Область действия закона об исчезновении различий между газом и его конденсатом при давлениях, превышающих критическое, – это замкнутые, изолированные для возможности массопереноса системы, т.е. по сути системы, аналогичные тем экспериментальным ампулам, на которых представления о критических параметрах вещества и были разработаны. Поэтому применение этих представлений к реальным геохимическим процессам, протекающим в открытых (или избирательно открытых, о чем пойдет речь ниже) системах, является некорректным, что может привести (и привело) к серьезным теоретическим просчетам.

Вторая причина, дающая определенные основания для игнорирования выводов наблюдательной вулканологии, – факты магматической геологии, свидетельствующие об исчезновении с глубиной в магматических породах газовых полостей или их реликтов. Более того, подобные факты характерны и для пород субмаринных вулканических извержений, где с ростом перекрывающей водной толщи наблюдается аналогичная картина. С учетом этих данных, само появление в вулканических породах газовых полостей, как и наличие в разрезах вулканитов взрывных фаций, стали рассматриваться как признак мелководных или наземных условий формирования. Все эти данные свидетельствуют об исчезновении уже в условиях сравнительно небольших давлений газов в виде самостоятельной фазы. Поэтому считается, что газообразные соединения с увеличением глубины переходят в растворенное в магме состояние, и тем самым исчезают как самостоятельный объект

¹ Здесь под высокими давлениями понимаются давления, превышающих критические значения для потенциально газообразных соединений.

исследования. Получается, что с позиций магматической геологии рассуждения о ключевой роли газообразных соединений в магматическом процессе не имеют смысла из-за отсутствия самого объекта рассуждений.

Однако, если исходить из атомно-молекулярных представлений, то из исчезновения с глубиной газовых полостей или их реликтов следует лишь тот вывод, что в условиях повышенных давлений преимущественным способом перемещения газообразных соединений становятся процессы молекулярной диффузии. При этом газообразные соединения, как будет показано ниже, и в этом случае сохраняют ключевое значение для эволюции магматических систем, что позволяет распространить процитированные выше слова Перре на случай глубинных магматических процессов. В современных физико-химических науках явление газопроницаемости конденсированных сред хорошо известно. Существует целый ряд количественных наблюдений газовой диффузии в твердых телах. В тоже время специализированные геохимические исследования, посвященные изучению процессов газовой диффузии в сплошных средах, практически отсутствуют. Однако существует очень большое количество работ, посвященных экспериментам по определению “растворимости” газообразных или потенциально газообразных веществ в магматических расплавах и изучению их влияния на кристаллизационные процессы. Во всех этих экспериментах макропонятие “растворение” по своей сути соответствует процессу диффузионного внедрения молекул газообразного вещества в структуру расплава. Тем не менее, сами эксперименты ориентированы не на исследование диффузионного потока вещества, что было бы более ценным для применения полученных результатов к открытым природным системам, а на определение условий диффузионного насыщения в конкретной изолированной системе при определенных давлении (т.е. определенной концентрации молекул газа) и температуре (т.е. энергии теплового движения).

Способ диффузионного перемещения достаточно крупных молекулярных агрегатов в структуре твердого тела хорошо известен с 70-х годов прошлого века, когда работами М.А. Кривоглаза [1970] было установлено, что в твердых растворах замещения с сильно отличающимися атомными радиусами могут формироваться дефектные области (комплексы), где n примесных атомов расположено на $(n + 1)$ или $(n - 1)$ узлах решетки. Диффузионное перемещение подобных дефектов и обеспечивает тот механизм, при помощи которого могут перемещаться иногда довольно крупные молекулярные структуры летучих соединений.

Важно еще раз подчеркнуть, что в случае сплошных сред диффузионным способом перемещаются молекулярные структуры вещества в газообразном состоянии. Если температура вещества превышает критическую, то все его молекулы получают способность активно перемещаться посредством газовой диффузии. При температуре ниже критической концентрация молекул в газообразном состоянии имеет верхний предел, соответствующий парциальному давлению насыщенных паров вещества при данной температуре.

Все избыточные по отношению к этому пределу молекулы вещества переходят в конденсированное состояние, т.е. объединяются в молекулярные агрегаты за счет появления дополнительных сил межмолекулярного взаимодействия. Именно наличие этих сил создает определенный барьер, ограничивающий возможность отрыва молекул вещества и их последующего диффузионного перемещения и тем самым приводящий к относительной иммобилизации конденсатных образований. Таким образом, в случае сплошных сред в процессах диффузионного перемещения наиболее активно участвуют молекулы вещества в газообразном состоянии. Этот диффузионный поток сохраняется и в случае наличия в среде конденсата данного вещества. Наиболее активные молекулы покидают конденсатные агрегаты и диффундируют во вмещающую среду, на смену им из вмещающей среды приходят другие. Баланс обмена молекулами между газообразным и конденсированным состояниями вещества соответствует парциальному давлению насыщения паров этого вещества при данной температуре.

Обычно в качестве основного фактора, в наибольшей степени влияющего на эволюцию вещественного состава магм, указывают на гравитационную дифференциацию вещества в магматической камере, факт протекания которой в расплавах низкой вязкости признается большинством исследователей. При этом абсолютно не учитывается возможность диффузионного переноса породообразующих элементов в составе газообразных соединений. Однако как только мы признаем возможность диффузионного перемещения газов в сплошных средах (что с физической точки зрения бесспорно), так сразу мы обязаны учитывать и другой общеизвестный факт – возможность переноса кремнезема высокотемпературными парами воды в составе нескольких разновидностей летучих веществ в зависимости от плотности пара (Айлер, 1982). Причем эффективность этого переноса с ростом давления водяного пара только возрастает.

Факт переноса кремнезема в составе газообразных соединений подтверждается непосредственными наблюдениями на активных вулканах. Веским доводом в пользу этого фактора является наличие хорошо выраженной прямой корреляция между эксплозивностью магмы и содержанием двуокиси кремнезема в извергающемся материале – пики эксплозивной активности соответствуют извержению наиболее кислых пород (см. рис. 5). Эта корреляция прослеживается в цикличности разных временных масштабов, причем амплитуды колебаний газонасыщенности и содержания SiO_2 в извергающемся материале соответствуют друг другу. По нашему мнению, именно процесс диффузионного переноса кремнезема и других веществ в составе газообразных соединений является главным фактором эволюционной изменчивости природных магматических систем. В частности, применительно к эволюции вещественного состава магм Безымянного о какой гравитационной дифференциации вещества в магматической камере под ним вообще может идти речь, если либо (1) вязкость магмы настолько велика, что магматический канал не обнаруживается сейсмическими методами (точка зрения автора), либо

(2) магматический канал представлен толщей пород, в которой расплав (или флюид) заполняет мелкие трещины и поэтому не оказывает заметного влияния на динамические параметры сейсмических волн (предположение, сделанное в работе (Балеста и др., 1991)).

Не так давно появился ряд работ (Наумов и др., 1995, 1996, 1997), результаты которых свидетельствуют о наличии “сверхдавления флюидов” в магматическом и постмагматическом газогидротермальном процессах. На наш взгляд, подобное “сверхдавление флюидов” по своей сути лишь отражает не только наличие, но и высокую концентрацию диффузионного потока эндогенных газообразных соединений. Именно наличие подобного избыточного давления обеспечивает высокую динамическую активность самих флюидных систем. При этом сам факт наличия избыточно высокого по отношению к литостатическому флюидного давления известен довольно давно. А.И. Кудряшов (1991) отмечает, что так называемые аномально высокие пластовые давления широко распространены во многих регионах мира, и с увеличением глубины залегания флюида появление аномальных значений его давлений, по существу, является нормой. Следует отметить и то важное для данной работы обстоятельство, что ряд исследователей сверхвысоких флюидных давлений (Аникеев, 1980; Кропоткин, 1980 и др.) напрямую соотносят их возникновение с процессами дифференциации и дегазации мантии Земли.

В связи с вышесказанным под понятием “газ” в эндогенных условиях понимаются легкие молекулярные образования, не образующие устойчивых межмолекулярных связей ни между собой, ни с вмещающими породами, способные перемещаться в условиях сплошных сред посредством молекулярной диффузии. С учетом этого определения динамическую модель вулканического процесса можно обобщить на случай магматического процесса в целом.

Таким образом, источником динамической активности магматических систем является диффузионный поток эндогенных летучих в газообразном состоянии. Перемещение этого потока из-за разности плотностей между газообразными соединениями и вмещающими молекулярными структурами – энергетически выгодный процесс. Его развитие обуславливает выделение тепла. Дополнительная тепловая энергия, усиливая колебательные движения в структуре вещества, повышает миграционную способность входящих в его состав соединений, что в свою очередь создает еще более благоприятные условия для гравитационного перераспределения вещества Земли, для концентрации диффузионных потоков, а следовательно, и для еще большего выделения тепловой энергии. В итоге выделяющейся энергии становится достаточно для начала парциального плавления пород, тем более, что присутствие летучих существенно понижает температуры их плавления. Появление расплавной фазы еще более облегчает миграцию газообразных компонентов, и образующаяся магма становится путем преимущественного перемещения газообразных соединений. В свою очередь, насыщенные летучими расплавы сами становятся динамически активными и способными к внедрению в окружающие

породы в направлении наименьшего сопротивления. Диффузионный перенос вещества в виде газообразных соединений является одним из основных факторов химической эволюции магматических систем, определяющим, в частности, полицикличность изменения содержания кремнезема в продуктах вулканических извержений. Прикладным следствием из рассмотренной выше динамической модели магматического процесса является модель серного перехвата в эндогенном рудообразовании.

Дегазационная модель планетарной эволюции

Данная глава написана с использованием результатов совместных работ с Л.К. Малышевой и представляет собой дальнейшее обобщение и развитие динамической модели магматического процесса уже как фактора планетарной эволюции. Планеты рождаются, живут и умирают. И в разные стадии развития на них протекают различные процессы. В наибольшей степени эволюции подвержены процессы гравитационной дифференциации вещества планеты. Начиная с момента ее образования, в формирующемся гравитационном поле протекает перераспределение вещества – под воздействием силы тяжести более тяжелые компоненты в своем стремлении к центру тяжести вытесняют более легкие. Энергетический эффект этого процесса определяется разностью плотностей между тяжелыми и легкими компонентами и достигает наибольших величин, во-первых, там где сила тяжести максимальна, т.е. в приповерхностных частях планеты, а во-вторых, при вытеснении из глубин планеты наиболее легких компонентов, т.е. в ходе дегазационных процессов. В конечном счете, вся гидросфера и атмосфера Земли была образована в ходе дегазации коры и верхней мантии.

В ходе гравитационного перераспределения планетарного вещества выделяется значительное количество тепловой энергии, что приводит к частичному плавлению вещества в зонах гравитационной дифференциации. Появление жидкой фазы облегчает дегазационные процессы как на молекулярном уровне, так и в виде обособившихся и находящихся под высоким давлением газовых пузырьков. В результате процесс гравитационного перераспределения вещества еще больше усиливается с одновременным увеличением выделения тепловой энергии, позволяющей перевести в подвижное состояние все большее количество вещества окружающих пород за счет плавления и мобилизации газовой фазы. Поэтому вулкано-магматическую деятельность можно рассматривать как форму протекания планетарных дегазационных процессов. Отсюда следует, что планетарная эволюция в наибольшей степени должна прослеживаться в развитии дегазационных процессов, равно как и в форме их проявления – в магмо-тектонической активности.

В работе рассмотрены схемы эволюции магмо-тектонической активности для Земли и Марса. Показано, в частности, что для Земли, с ее большим дегазационным потенциалом и продолжающимися эндогенными процессами, возможны следующие стадии развития: 1) эпоха общепланетной дегазации и

повсеместной магмо-тектонической активности, приведшая к формированию протопланетной (протоокеанической) коры; 2) эпоха локализации дегазационных и магмо-тектонических процессов в пределах отдельных площадей, обусловившая формирование протоконтинентов и древнейших платформ Земли; 3) эпоха локализации дегазационных и магмо-тектонических процессов в пределах поясов повышенной эндогенной активности; 4) эпоха линейной локализации дегазационных процессов и магмо-тектонической активности, приведшая к раскалыванию протоконтинентов Земли и к формированию спрединговых и субдукционных структур на ее поверхности; 5) эпоха точечной локализации дегазационной и магмо-тектонической активности; 6) эпоха полного прекращения гравитационно-дифференциационных процессов в недрах планеты, и соответствующего прекращения проявлений магмо-тектонических процессов на ее поверхности. В настоящее время Земля находится на 4-й из вышеперечисленных стадий развития, тогда как формирование, например, геологических структур Урала было завершено на 3-ей стадии – в эпоху поясовой магмо-тектонической активности.

Все вышесказанное и детально рассмотренное во второй части работы обосновывает **II защищаемое положение: Первоисточником зарождения и динамической активности магматических систем является диффузионный поток эндогенных летучих в газообразном состоянии, газовый фактор определяет энерго- и массоперенос в эндогенных процессах, а дегазационные процессы имеют определяющее значение для постаккреционной планетарной эволюции.**

ЧАСТЬ III. СЛЕДСТВИЯ – ГЕОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЭНДОГЕННЫХ КОНДЕНСАТОВ

Данная часть диссертационной работы направлена на рассмотрение некоторых практических следствий, вытекающих из представлений о ключевой роли газового фактора в магматическом процессе и о возможном существовании потоков газообразных соединений, способных перемещаться в глубинах Земли посредством молекулярной диффузии.

Физико-химическая эволюция высокотемпературных эндогенных флюидов

Как уже отмечалось выше, эмпирически установленный физический закон об исчезновении различий между газом и жидкостью в критической точке справедлив лишь для условий тех запаянных колб, в которых он собственно и был установлен. Однако даже для этих условий строгость выполнения данного закона не гарантируется, поскольку с ростом давления и/или температуры наблюдается диффузионная утечка газообразных соединений сквозь стенки сосуда (см. например, [Израилов и др., 1967; Израилов, 1972]). Поэтому даже в случае сплошных сред любая геологическая система будет избирательно открыта для перемещения газообразной составляющей флюидно-

го потока и закрыта для конденсатной.

С учетом вышесказанного ниже под флюидным потоком понимается перемещение летучих соединений в эндогенных условиях, которое может осуществляться как путем молекулярной диффузии этих соединений, так и посредством миграции мобильных газовых и газожидких обособлений.

Миграция флюидного конденсата происходит по сообщающимся порам и трещинам, зонам тектонических нарушений или путем перемещения (всплывания) газожидких обособлений в маловязких магматических расплавах. Миграция газовой фазы эндогенных флюидов осуществляется дополнительно к вышперечисленному еще и путем прямой молекулярной диффузии сквозь растворы, расплавы и кристаллическую решетку минералов горных пород. При этом скорость молекулярной диффузии повышается с ростом температуры и давления, что делает эту форму перемещения флюидного вещества наиболее благоприятной для условий высокотемпературных эндогенных процессов.

Природные летучие соединения имеют различные критические параметры, а высокотемпературные эндогенные флюиды, как правило, являются многокомпонентной смесью подобных веществ. В связи с этим переходы “газ–жидкость” играют важнейшую роль в ходе эволюции эндогенных флюидов. При охлаждении высокотемпературной газовой смеси и достижении критической температуры одного из веществ, составляющих смесь, происходит образование высокотемпературного конденсата, в который сбрасывается избыток вещества с наиболее высокой критической температурой. Здесь до определенной степени возможна аналогия с процессами кристаллизации магматического расплава. Как при охлаждении магмы в силикатном расплаве начинается образование и рост кристаллов, так и в высокотемпературном флюиде происходит образование капелек жидкости и их укрупнение. Однако кроме сходства здесь имеется и очень существенное различие.

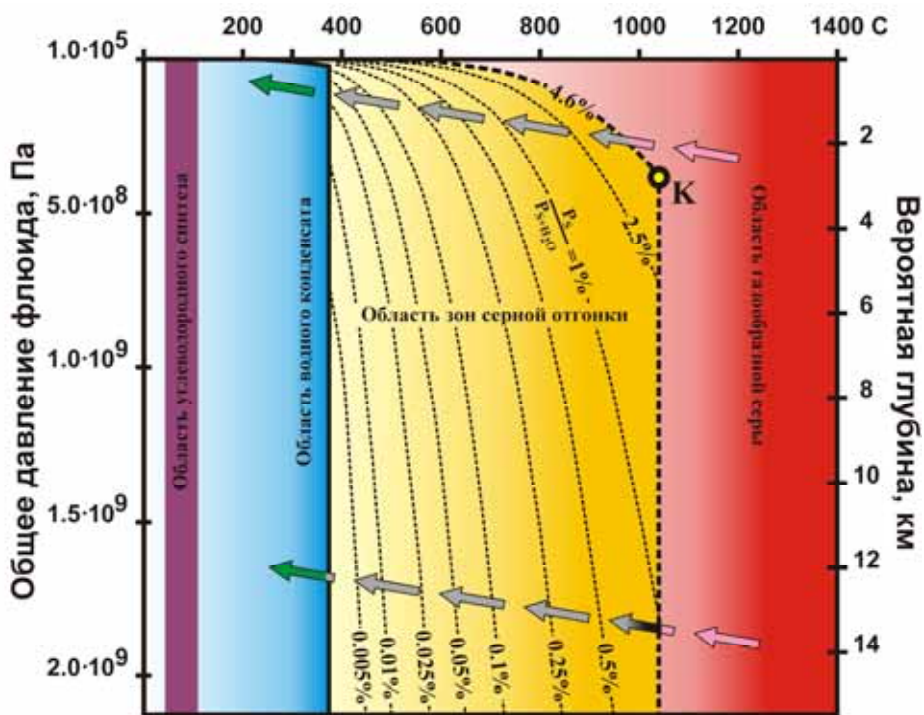
В отличие от остаточного магматического расплава в остаточном высокотемпературном флюиде отсутствуют силы поверхностного натяжения, и он, согласно газовым законам, стремится равномерно распределиться по всему доступному пространству. В то же время образовавшийся высокотемпературный конденсат, напротив, благодаря наличию сил поверхностного натяжения стремится занять минимальный объем. Это делает возможным быстрое разделение флюида на конденсированную и остаточную газовую фазы. Если в магме остаточный расплав и растущие кристаллы могут длительное время находиться совместно, то в высокотемпературных флюидных потоках возможна быстрая сепарация на остаточную газовую смесь, диффундирующую сквозь сплошные среды, и высокотемпературный конденсат, концентрирующийся в виде самостоятельных сравнительно малоподвижных соединений.

Скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ обуславливает существование трех геохимических областей, имеющих большое теоретическое и практи-

ческое значение (рис. 6): 1. Область зон серной отгонки, в которой происходит сброс конденсата серы. Эта область имеет большое значение для образования многих рудных месторождений, а в той части, где область примыкает к барьеру водной нейтрализации, происходит формирование эндогенных месторождений собственно самородной серы. 2. Область зон водной отгонки, приводящая к появлению на пути эндогенных флюидов барьера нейтрализации и последующего зарождения волны повышенной кислотности. Эта зона имеет ключевое значение для формирования гидротермальных, золоторудных и кварцевых месторождений. 3. Область зон сероводородной и углекислотной отгонки (зон ЕУС), играющая ведущую роль в формировании месторождений углеводородного сырья. В диссертационной работе первая и третья зоны рассмотрены достаточно подробно в соответствующих главах, тогда как вторая лишь частично затронута при анализе образования приповерхностных измененных пород Гайского медноколчеданного месторождения.

Рис. 6. Важнейшие геохимические области в эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов.

Вероятная глубина соответствует 5-кратному литостатическому эквиваленту давления. При построении диаграммы использованы данные о давлении паров насыщения и критических параметрах веществ из [Физические..., 1991, табл. 11.1–11.6, 13.4–13.6].



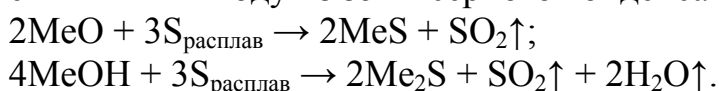
Зоны образования серного конденсата и их роль в эндогенном рудообразовании

С геологической точки зрения критические параметры серы и ее фазовая диаграмма представляют большой интерес, так как критическая температура попадает в интервал возможного существования магматических расплавов, а линия насыщения паров лежит в области температур постмагматического газогидротермального процесса. При пересечении магматическим флюидом линии насыщения или линии критической температуры происходят спонтанные конденсация и сброс избыточной серы. Благодаря этому, на пути движения высокотемпературных эндогенных флюидов возможно существование зон “отгонки”

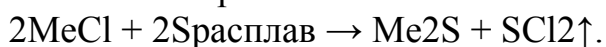
серы, в которых она сбрасывается из газообразного состояния и из состава серосодержащих летучих соединений (H_2S , SO_2) в жидкий конденсат. Именно здесь наиболее интенсивно протекают процессы массового сульфидообразования, т.к. в щелочной высокотемпературной среде молекулярная сера оказывается практически единственным и очень мощным окислителем для транспортируемых газами металлов. Барьер водной нейтрализации является зоной возможного устойчивого существования собственно самородной серы. При попадании серы в кислую среду зоны водного конденсата она окисляется, образуя сернистую и серную кислоты, а при реакции с соединениями металлов – их соли.

Вне зон отгонки серы концентрация ее паров, как правило, незначительна по сравнению с более распространенными родственными газами – H_2S и SO_2 . Однако там, где есть возможность сброса серы из газообразного флюида в жидкое состояние, т.е. в зонах отгонки, резко активизируются следующие реакции: 1) $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S}\downarrow + \text{H}_2$; 2) $2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \rightarrow 3\text{S}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$; 3) $2\text{H}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{S}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$.

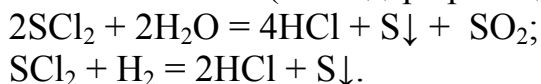
В щелочной высокотемпературной среде молекулярная сера оказывается практически единственным и очень мощным окислителем для транспортируемых флюидным потоком металлов. Ее высокую химическую активность определяет тот факт, что в условиях высоких температур она сбрасывается не в виде обычных замкнутых восьмиатомных колец, а в виде коротких 2–4 атомных ($N_{\text{кр}} = 2.78$) обрывков цепей, крайние атомы в которых являются высокоактивными радикалами. Сера является химическим аналогом кислорода, более слабым в обычных условиях, но в зонах своей высокотемпературной отгонки она начинает его активно вытеснять из окисных и гидроксидных соединений с металлами и кислородсодержащих солей. Это становится возможным благодаря образованию летучих кислородсодержащих соединений и их выводу из зоны серного конденсата:



Аналогично протекает вытеснение галогенов из транспортируемых газовым потоком и перехватываемых в зонах серной отгонки галогенидов:



Легколетучие и быстро удаляющиеся из зоны серного конденсата галогениды серы, сами по себе термически неустойчивые, в газовом потоке практически сразу разрушаются под воздействием высокотемпературных паров воды и избыточного (благодаря распаду H_2S) водорода:



Сульфиды щелочных и щелочноземельных металлов под воздействием высокотемпературных паров воды неустойчивы и быстро разрушаются с выносом этих металлов из зон отгонки, тогда как их место в серно-сульфидном конденсате занимают более устойчивые в сульфидных соединениях *d*- и *p*-элементы. Эти элементы перехватываются зонами серно-сульфидного конденсата как из газового потока, где они переносятся в виде соединений с галогенами, так и из ка-

пель щелочного конденсата, где они существуют в виде солей, в которых соответствующий элемент является кислотообразующим (типа K_2FeO_4).

Рудообразующая роль зон серного перехвата имеет первостепенное значение для образования в эндогенных условиях не только сульфидных руд, но и оксидных руд *d*- и *p*-элементов. Это обусловлено возможностью последующей трансформации рудных концентраций из сульфидной формы в оксидную под воздействием высокотемпературных эндогенных флюидов. Так, например, при падении содержания серы в составе высокотемпературного флюида или повышении его температуры ранее образовавшаяся в зонах серной отгонки сульфидная минерализация оказывается неустойчивой. В результате под воздействием высокотемпературных паров воды происходит ее отжиг с формированием оксидной минерализации: $FeS + H_2O \rightarrow FeO + H_2S$, $Cr_2S_3 + 3H_2O \rightarrow Cr_2O_3 + 3H_2S$ и т.п. Возможно, что именно этим процессом обусловлен генезис многих высокотемпературных месторождений железных руд, хромита и т.п. Кроме высокотемпературного отжига перевод первоначальной сульфидной минерализации в оксидную форму возможен при понижении температуры, пересечении барьера нейтрализации и переходе эндогенного флюида в форму кислых гидротермальных растворов. При этом сульфиды таких элементов как, например, Sn, Mo, W, Ge переходят в оксидную форму: $SnS + 2H_2SO_4 \rightarrow SnO_2 \downarrow + 2SO_2 \uparrow + 2H_2O$. Возможность этого процесса подтверждается тесной ассоциацией промышленно значимых скоплений касситерита, вольфрамита, шеелита, вольфенита со сбрасываемым в кислой среде кварцем.

В образовании сульфидных руд магматических месторождений большое значение имеют рудные ловушки, т.е. такие специфические РТ-условия, благодаря которым происходит массовый сброс высокотемпературным эндогенным флюидом избыточной серы с последующим интенсивным сульфидообразованием. Всего выделено пять типов рудных ловушек. Первые четыре типа характерны для эволюции магматических и постмагматических флюидов в малоглубинных условиях, тогда как пятый тип наиболее четко проявляется в условиях больших глубин. Концепция серного перехвата позволяет вполне корректно и адекватно рассмотреть генезис магматических оксидных рудных концентраций с единой точки зрения, объясняя при этом многие из наблюдающихся закономерностей.

Геохимическая активность сероводородного и углекислотного конденсатов¹

Рассмотрим образование и функционирование зон естественного углеродородного синтеза (зон ЕУС) на примере субаэральных условий Земли.

Будем считать, что эндогенные летучие, перемещающиеся к поверхности Земли в ходе дегазационных процессов, находятся в тепловом равновесии с вмещающими породами, т.е. перемещение летучих происходит по линии геотермического градиента (трасса А на диаграмме рис. 7).

¹ Данный раздел написан по материалам совместных работ автора с Л.К. Малышевой

Рис. 7. Положение зоны ЕУС (показаны темно-синим цветом) в земных субаэральных условиях.
Пояснения – см. текст.

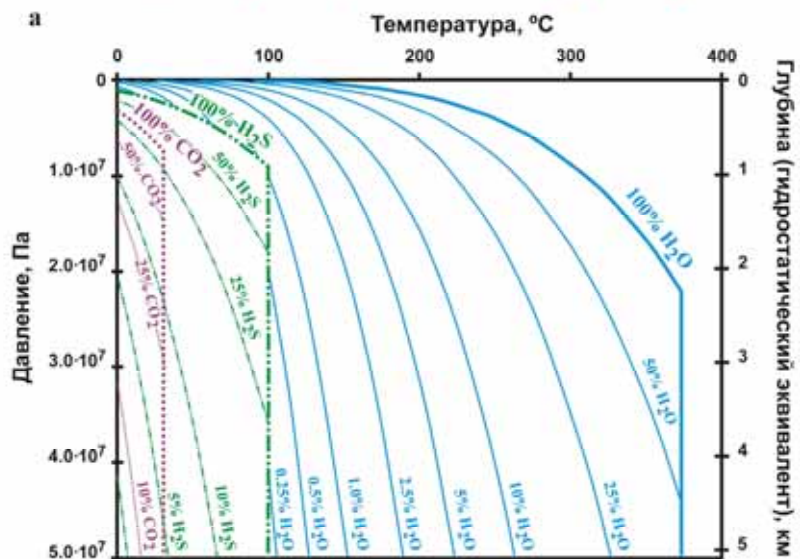
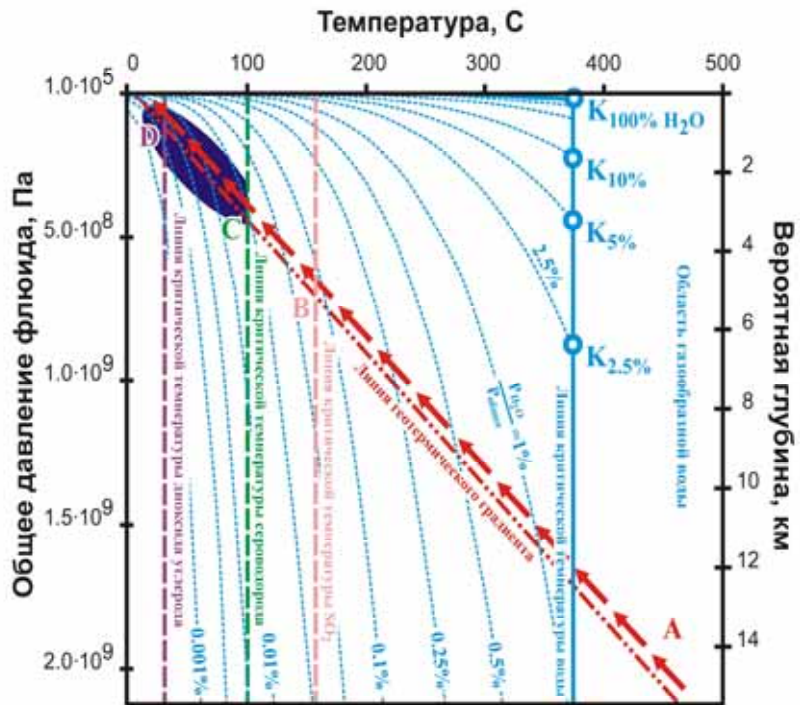
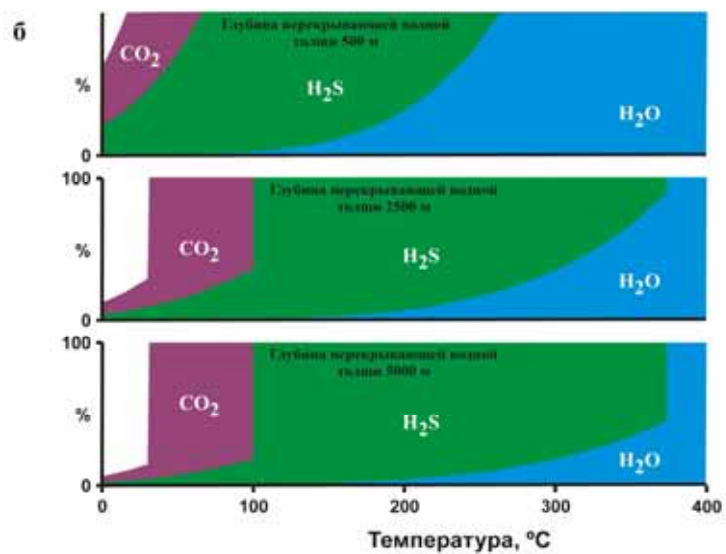


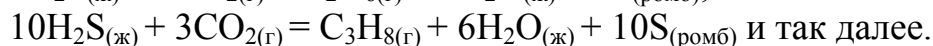
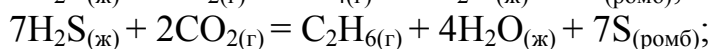
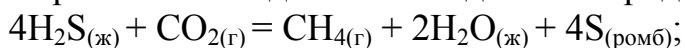
Рис. 8. Соотношение РТ-условий конденсации воды, сероводорода и диоксида углерода с гидростатическим давлением (а) и температурные зависимости предельного парциального давления пара этих веществ на глубинах 500, 2500 и 5000 м б). Для простоты изолинии насыщения воды в областях конденсации сероводорода и диоксида серы не показаны.



Ради определенности будем считать, что температура пород непосредственно вблизи поверхности составляет 5°C, а геотермический градиент составляет 0.03 град./м. Для перехода от общего флюидного давления к вероятной глубине при построении диаграммы (рис. 7) воспользуемся данными (Наумов и др., 1997) о 5-кратном (в среднем) превышении флюидного давления над его литостатическим эквивалентом. Это представляется вполне корректным, поскольку для перемещения флюидного потока требуется повышенный градиент давления, наиболее высокий в случае перемещения флюида путем молекулярной диффузии.

Образование зон ЕУС связано с выпадением в конденсат из состава газовой смеси сначала сероводорода, а затем диоксида углерода. Область зон образования сероводородного конденсата связана с критической температурой сероводорода – 100.4°C. В соответствии со сделанными выше предположениями, движущийся по линии геотермического градиента флюид (трасса А на диаграмме рис. 7) входит в зону конденсации сероводорода на вероятной глубине 3.2 км (точка С). В точке входа остаточное парциальное давление паров воды составляет всего 0.024% от общего флюидного давления, паров диоксида серы – 0.63%. Поэтому в составе газовой фазы флюида доминирует диоксид углерода, водород и сероводород. Однако на входе в область сероводородной отгонки его содержание в газовой фазе скачкообразно уменьшается до уровня остаточного парциального давления, составляющего 2.06% от общего флюидного давления, тогда как весь избыток сбрасывается в конденсат с образованием на пути газового потока области зон сероводородной отгонки.

В этой области при фильтрации газообразного диоксида углерода сквозь сероводородный конденсат происходит образование углеводородного сырья с одновременным выделением воды и самородной серы:

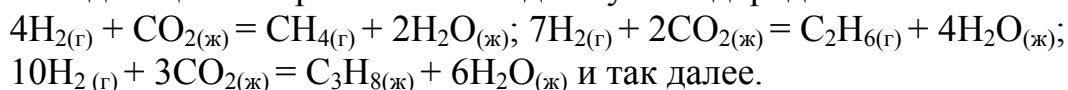


Направленность этих химических реакций определяется принципом Ле Шателье–Брауна: в условиях повышенного давления флюидной смеси равновесие этих реакций смещается в сторону уменьшения объема газообразных соединений. Этот же эффект дает выпадение в осадок образующейся самородной серы.

Образующиеся в зоне сероводородного конденсата сравнительно тяжелые простейшие углеводороды, начиная с бутана и бутилена, формируют углеводородный конденсат. Так как критические давления этих соединений относительно невелики, то их остаточные парциальные давления имеют очень низкий уровень. Повышенная температура и общее флюидное давление способствуют дальнейшим реакциям полимеризации углеводородов с образованием более тяжелых соединений. Более легкие углеводороды, такие как метан, этан, этилен, пропан и пропилен, имея более низкие критические температуры, полностью остаются в газообразном состоянии. Фильтруясь через конденсат более тяжелых углеводородов, они частично поглощаются в ходе реакций полимеризации. Оставшаяся часть продолжает эволюцию в составе газовой фазы флюида.

Однако два последних из вышеперечисленных легких углеводородных соединений – пропан и пропилен – недалеко уходят по трассе эволюции флюида от места их первичного образования в зоне сероводородной отгонки. Пропан достигает своей критической температуры 96.67°C почти сразу после зоны сероводородной отгонки – на вероятной глубине 3.06 км. При этом из-за его низкого критического давления в конденсат сбрасывается все количество пропана, превышающее равновесный уровень парциального давления 0.36% от общего флюидного давления в данной точке. Чуть дальше по трассе флюида, на вероятной глубине 2.9 км, расположена зона отгонки пропилена, имеющего чуть более низкую критическую температуру. В этой зоне в конденсат сбрасывается весь избыточный пропилен, превышающий уровень парциального давления пропиленовых паров в 1.16%. В этих зонах отгонки, как и в зоне сброса сероводорода, протекают реакции полимеризации углеводородов, в которые частично вовлекаются в фильтрующиеся сквозь конденсат легкие углеводородные соединения.

Еще одна зона ЕУС связана с конденсацией диоксида углерода. В соответствии со сделанными при построении диаграммы (рис. 7) предположениями, критическая температура диоксида углерода (30.85°C) достигается на вероятной глубине около 860 м (точка D на диаграмме рис. 7). При входе в эту зону остаточные газы эндогенного флюида состоят в основном из CO₂, H₂ и в меньшей степени из легких летучих углеводородов. Уровень давления остаточных паров воды в точке входа составляет лишь около 0.004% от общего флюидного давления, давление остаточных паров SO₂ – 0.4%, H₂S – 1.9%. На входе в зону давление паров CO₂ скачкообразно уменьшается до предельно возможного критического уровня, соответствующего в данной точке 6.2% от общего флюидного давления. Весь избыток диоксида углерода сбрасывается в конденсат, сквозь который происходит фильтрация водорода, сопровождающаяся образованием воды и углеводородов:



Как и в случае сероводородной зоны ЕУС, равновесие этих реакций в условиях повышенного давления флюидной смеси смещается в сторону уменьшения объема газообразных соединений, т.е. в сторону образования углеводородов. Образование углеводородов происходит и при фильтрации сквозь конденсат диоксида углерода остаточного газообразного сероводорода. Но поскольку его содержание в остаточных газах не превышает 2%, то общее количество образующейся при этом серы сравнительно невелико. Легкие углеводороды, фильтруясь сквозь углеводородный конденсат, частично поглощаются за счет реакций образования более сложных углеводородных соединений.

В том случае, когда температура флюидного потока превышает температуру вмещающих пород (что вполне обычно для газо-гидротермальной деятельности), возможно образование зон abiогенного синтеза по периферии флюидного потока по мере снижения его температуры до соответствующих значений

100.4°C и 30.85°C. В субаэральных условиях эти зоны на поверхность, как правило, не выходят, исходя из критических давлений сероводорода и диоксида углерода (9.010 и 7.378 МПа соответственно) при условии 5-кратного превышения флюидным давлением его литостатического давления сброс этих соединений в конденсат на соответствующих изотермических поверхностях может происходить лишь на глубинах более 65 и 53 м соответственно.

По иному складывается ситуация в субмаринных условиях (рис. 8). Здесь перекрывающая водная толща, во-первых, обеспечивает дополнительное гидростатическое давление, а во-вторых, обеспечивает эффективное принудительное охлаждение как самого потока высокотемпературных эндогенных флюидов, так и придонных пород, разогреваемых гидротермами. Давление перекрывающей водной толщи обеспечивает теоретическую возможность конденсации сероводорода и диоксида углерода непосредственно в придонных породах, а резкое снижение температуры флюидного потока в придонных породах обуславливает практическую реализацию этой возможности. По сути, здесь мы имеем дело с геохимической температурной ловушкой, которая уже рассматривалась ранее применительно к процессу образования сульфидных руд подводных гидротерм¹. Как и в случае рудообразования, эффективность действия этой ловушки возрастает с увеличением давления. Как можно видеть на графиках рис. 8б, с увеличением мощности перекрывающей водной толщи конденсация H₂O, H₂S и CO₂ в придонных породах протекает все более контрастно с увеличением доли конденсации на изотермах критических температур этих веществ. Необходимо отметить, что конденсация сероводорода и диоксида серы возможна и в самой водной толще, однако в этом случае образование зон ЕУС маловероятно из-за реакций взаимодействия образующегося конденсата с водой. Таким образом, благодаря действию температурной геохимической ловушки зоны ЕУС наиболее эффективны в придонных породах глубоководных гидротерм океана, где они контролируются изотермальными поверхностями соответствующих критических температур. Вещественные проявления этих процессов можно наблюдать в современных выходах высокотемпературных гидротерм на поверхность дна океана (Биология..., 2002; Гидротермальный..., 2006).

Далее в данной главе возникновение предбиологических состояний с зарождение и функционированием зон абиогенного углеводородного синтеза в развитии планетарных дегазационных процессов увязывается. В свою очередь зоны абиогенного углеводородного синтеза жестко фиксируются определенными РТ-условиями образования сероводородного и углекислотного конденсатов. Однако на различных телах нашей Солнечной системы эти условия реализуются различным образом. Это позволяет смоделировать условия возникновения предбиологических состояний не только на Земле, но и на других телах Солнечной системы. Проведенный в главе анализ показывает, что все планеты нашей Сол-

¹ см. раздел, посвященный конденсату серы, а также работу [Малышев, 2007].

нечной системы, а также их спутники и малые небесные тела с размерами от нескольких сотен километров, в своей эволюции проходят или проходили стадию развития дегазационных процессов. Закономерным следствием планетарной дегазации является формирование зон естественного углеродного синтеза, в которых вследствие проявления геохимической активности конденсатов сероводорода и диоксида серы активно протекают процессы образования и самоорганизации сложных углеводородных соединений и которые, таким образом, являются вероятной средой для зарождения и последующей эволюции саморазвивающихся систем, т.е. своеобразной “жизни” на углеводородной основе.

Среди многочисленных и разнообразных вариантов зарождения этой “жизни” условно можно выделить две резко различающиеся группы. Для первой группы характерно зарождение и последующее развитие жизни в конденсированных средах (каменной, ледовой, водной и водно-ледовой). Эта группа вариантов свойственна всем небольшим планетам и малым небесным телам. Исключение составляют лишь небесные тела, перегретые относительно условий формирования зон ЕУС под воздействием внешних или внутренних причин: Венера и Меркурий – солнечная радиация; Ио – разогрев под воздействием сил приливного трения. Вторую группу вариантов представляют планеты-гиганты, для которых имеются исключительные условия для зарождения и быстрой эволюции углеводородной “жизни” в газовой среде.

Случай зарождения и развития жизни на Земле довольно специфичен, хотя Человечеству и свойственно его абсолютизировать. Земля, с одной стороны, попадает в группу вариантов зарождения “жизни” в конденсированных средах, а с другой – по условиям воздействия солнечной радиации близка к “перегретым” планетам – Венере и Меркурию. Довольно высокие значения поверхностной температуры и термического градиента обусловили максимально близкое к поверхности залегание зон ЕУС, а сравнительно большая гравитация нашей планеты обеспечила достаточный уровень давления для эффективного функционирования зон ЕУС. Последующий вынос протожизни флюидными струями из этих зон в породах дна океана или с малых глубин под поверхностью материков привел к отрыву протожизни от первоначального источника энергии. А это, в свою очередь, обусловило адаптацию первичной жизни к существованию за счет энергии солнечного света. Дальнейшая эволюция жизни на Земле привела к существенному разветвлению и усложнению цепей питания, однако в основе их по-прежнему лежит энергия солнечного света.

Тем самым все вышесказанное в данном разделе обосновывает **III защищаемое положение: Скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ обуславливает существование ряда геохимических РТ-областей, среди которых большое теоретическое и практическое значение имеют: 1) область зон серной отгонки, в которой происходит сброс конденсата серы, имеющая ключевое значение для формирования многих типов рудных месторождений полезных ископаемых; 2) область зон водной от-**

гонки, приводящая к появлению на пути эндогенных флюидов барьера нейтрализации и последующего зарождения волны повышенной кислотности; 3) область зон сероводородной и углекислотной отгонки, играющая существенную роль в формировании месторождений углеводородного сырья и в возникновении предбиологических состояний, т.е. в создании условий для возможного зарождения жизни.

Список работ автора по теме диссертации

Автор диссертации имеет около **160 публикаций**, из них практически все по теме диссертации. Защищаемые положения в полном объеме отражены в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, определенный ВАК Минобр РФ:

1. **Малышев А.И.** Извержения вулкана Безымянный в 1981-1984 гг. // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 89–93.
2. **Алидибилов М. А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т., Фирстов П.П., Гирина О.А., Белоусов А.Б., Жданова Е.Ю., Малышев А.И.** Извержение вулкана Безымянный в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 3–17.
3. **Alidibirov M.A., Bogoyavlenskaya G.E., Kirsanov I.T., Firstov P.P., Girina O.A., Belousov A.B., Zhdanova E.Yu., Malyshev A.I.** The 1985 Eruption of Bezemyannyi // *Volcanology and Seismology*. 1990. V. 10(6). P. 839–863.
4. **Жаринов Н.А., Жданова Е.Ю., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Иванов А.П., Ханзутин В.П., Малышев А.И.** Активность Северной группы вулканов Камчатки в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 3–12.
5. **Максимов А.П., Фирстов П.П., Гирина О.А., Малышев А.И.** Извержение вулкана Безымянный в 1986 г. // Вулканология и сейсмология. 1991. №1. С. 3-20.
6. **Малышев А.И.,** Тихонов И.Н. Закономерности динамики форшок-афтершоковых последовательностей землетрясений в районе южных Курильских островов. // Докл. АН СССР. 1991. Т. 319, № 1. С. 134–137.
7. **Малышев А.И.** Динамика саморазвивающихся процессов. // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61–72.
8. **Maksimov A.P., Firstov P.P., Girina O.A., Malyshev A.I.** The June 1986 Eruption of Bezemyannyi // *Volcanology and Seismology*. 1992. V. 13(1). P. 1–20.
9. **Малышев А.И.** Динамика эруптивной активности вулкана Безымянный в 1986–1987 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 3. С. 16–27.
10. **Malyshev A.I.** Evolution of Bezemyannyi Eruptive Activity in 1986–1987 // *Vol. Seis.* 1995. V. 17. P. 257–270.
11. **Malyshev A.I., Tikhonov I.N.** Patterns of Japan Seismicity before the Large Earthquakes of 1985-1988 // *Vol. Seis.* 1996. V. 8. P. 299–314.
12. **Малышев А.И.** Направленный взрыв вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (вопросы интерпретации) // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 46–53.
13. **Малышев А.И.** Гиперболические закономерности сейсмической подготовки извержения в Шивелуч 12 ноября 1964 г. // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 70–78.
14. **Малышев А.И., Молошаг В.П.** Роль элементарной серы в формировании сульфидных руд // Докл. АН. 2000. Т. 370, № 1. С. 96–98.
15. **Malyshev A.I.** Hyperbolic Laws of Precursory Seismicity before the November 12, 1964, Shivelutch Eruption // *Vol. Seis.* 2000. V. 22. P. 337–350.
16. **Малышев А.И.** Особенности поведения серы в магматическом процессе // Докл. АН.

2000. Т. 374, № 5. С. 675–677.

17. **Малышев А.И.** Сера в высокотемпературном газо-гидротермальном процессе // Докл. АН. 2001. Т. 381, № 5. С. 665–668.
18. **Малышев А.И., Малышева Л.К.** Вулканизм и проблемы марсианского рельефообразования // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 27–40.
19. **Малышев А.И.** Изотопная сепарация серы в зонах высокотемпературной отгонки // Докл. АН. 2004. Т. 394. № 5. С. 669–672.
20. **Малышев А.И.** Особенности физико-химических свойств серы и их значение для эндогенного рудообразования // Литосфера. 2004. № 2. С. 94–107.
21. **Малышев А.И.** Рудные ловушки в магматическом сульфидообразовании // Докл. АН. 2004. Т. 396, № 3. С. 389–393.
22. **Малышев А.И.** Значение фазовых переходов “газ – жидкость” в эндогенном образовании углеводородного сырья // Докл. АН. 2004. Т. 399, № 3. С. 384–387.
23. **Малышев А.И., Тихонов И.Н.** Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени // Физика Земли. 2007. № 6. С. 37–51. [**Malyshev A.I. and Tikhonov I.N.** Nonlinear Regular Features in the Development of the Seismic Process in Time // ISSN 1069-3513, Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2007, Vol. 43, No. 6, pp. 476–489. DOI: 10.1134/S1069351307060067]
24. **Малышев А.И.** Особенности колчеданного рудообразования в субмаринных условиях разной глубинности // Докл. АН. 2007. Т. 414, № 6. С. 805–809. [**Malyshev A.I.** Specific Features of Massive Sulfide Ore Formation under Submarine Conditions at Various Depths // ISSN 1028-334X, Doklady Earth Sciences, 2007, Vol. 415, No. 5, pp. 751–754. DOI: 10.1134/S1028334X07050200]
25. **Малышев А.И.** Газовая диффузия в эволюции магматических систем // Докл. АН. 2008. Т. 422, № 2. С. 233–235. [ISSN 1028-334X, Doklady Earth Sciences, 2008, Vol. 422, No. 7, pp. 1113–1115. DOI: 10.1134/S1028334X08070258]
26. **Малышев А.И., Малышева Л.К.** Планетарные дегазационные процессы и условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы: I. Земля // Литосфера. 2009. № 2. С. 67–77.
27. **Малышев А.И., Малышева Л.К.** Планетарные дегазационные процессы и условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы: II. Планеты земного типа и планеты-гиганты // Литосфера. 2009. № 3. С. 64–74.
28. **Малышев А.И., Малышева Л.К.** Планетарные дегазационные процессы и условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы: III. Малые небесные тела, метеориты и открытый космос // Литосфера. 2009. № 4. С. 93–103.

В монографиях:

1. **Малышев А.И.** Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 262 с. (монография доступна в электронном виде по адресу http://ai-malyshev.narod.ru/VLife_Ru.html)
2. **Малышев А.И.** Сера в магматическом рудообразовании. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. 189 с. (монография доступна в электронном виде по адресу http://ai-malyshev.narod.ru/SInMagmas_Ru.html)
3. **Малышев А.И.** Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 111 с. (монография доступна в электронном виде по адресу http://ai-malyshev.narod.ru/SeisProc_Ru.html)

В электронном журнале “Вестник Отделения наук о Земле РАН”:

1. **Малышев А.И.** (ИГГ УрО РАН) Фазовые переходы “газ – жидкость” в эндогенном образовании углеводородного сырья / **Malyshev A.I.** (IGG UB RAS) Phase transitions “gas - liquid” in endogenic formation of hydrocarbon raw material // Электрон. науч.-информ. журнал “Вестник Отделения наук о Земле РАН”, № 1(22)' 2004, М.: ОИФЗ РАН, 2004. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1_2004/hydroterm-24.pdf
2. **Малышев А.И.** (ИГГ УРО РАН) Изотопная сепарация серы в эндогенных процессах / **Malyshev A.I.** (IGG UB RAS) Isotopic separation of sulphur in endogenic processes // Электрон. науч.-информ. журнал “Вестник Отделения наук о Земле РАН”, № 1(22)' 2004, М.: ОИФЗ РАН, 2004. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1_2004/izotop-3.pdf

Материалы международных, всесоюзных и всероссийских совещаний:

1. **Курсанов И.Т., Двигало В.Н., Гирина О.А., Разина А.А., Козырев А.И., Чубарова О.С., Малышев А.И.** Извержение в. Безымянного в 1984 г., его продукты, геологический и энергетический эффекты. // Вулканизм и связанные с ним процессы: Мат-лы VI Всесоюз. вулканол. совещ. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 34–35.
2. **Малышев А.И.** Динамика спонтанных процессов // “Геодезия-сейсмология: деформации и прогноз”: Мат-лы межд. симпоз. Ереван. 1989. С. 111–112.
3. **Malyshev A.I.** Life of a volcano (dynamic model of volcanic process on an example of historical eruptions of Bezymjanny volcano, Kamchatka) // EUG9. Abstracts of oral and poster presentations. 23–27 March. 1997. Strasbourg (France). P. 195.
4. **Malyshev A.I.** Dynamics of self-developing natural processes and prospects of its use for the quantitative time forecast of volcanic eruptions // EUG9. Abstracts of oral and poster presentations. 23–27 March. 1997. Strasbourg (France). P. 198.
5. **Малышев А.И.** Развитие элементов методики краткосрочного прогноза для района южных Курильских островов // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерагении подвижных поясов и платформенных областей литосферы: мат-лы межд. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 1998. С. 180–182.
6. **Малышев А.И. Молошаг В.П.** Роль элементарной серы в эндогенном сульфидообразовании // Полезные ископаемые: формирование, прогноз, ресурсы: мат-лы межд. конф. СПб.: СПбГУ, 1999. С. 92.
7. **Молошаг В.П., Малышев А.И.** Роль залежей самородной серы вулканических зрелых островных дуг в генезисе колчеданных месторождений // Полезные ископаемые: формирование, прогноз, ресурсы: мат-лы межд. конф. СПб.: СПбГУ, 1999. С. 93.
8. **Малышев А.И.** Динамика саморазвивающихся природных процессов и перспективы ее использования для прогноза геофизических катастроф // Геодинамика и геоэкология: мат-лы межд. науч. конф. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999. С. 233–235.
9. **Малышев А.И.** Перспективы количественного прогноза развития вулканической активности // Геодинамика и геоэкология: мат-лы межд. науч. конф. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999. С. 235–237.
10. **Малышев А.И., Тихонов И.Н.** Форшок-афтершоковые последовательности в районе Южных Курильских островов // Геодинамика и геоэкология: мат-лы межд. науч. конф. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999. С. 238–240.
11. **Тихонов И.Н., Малышев А.И.** Метод краткосрочного прогноза времени возникновения сильных землетрясений в районе южных курильских островов // Геодинамика и геоэкология: мат-лы межд. науч. конф. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999. С. 364–366.
12. **Malyshev A.I.** Dynamics of self-developing natural processes and prospects of its use for the forecast of geophysical catastrophes // IUGG99 Birmingham abstracts. 1999. Vo-

- lume B. P. 30.
13. **Malyshev A.I.** Behavior of gases during eruptions of Bezymyanni volcano // IUGG99 Birmingham abstracts. 1999. Volume B. P. 169.
 14. **Malyshev A.I.** Forming of Bezymyanni pyroclastic flows, Kamchatka // IUGG99 Birmingham abstracts. 1999. Volume B. P. 168.
 15. **Malyshev A.I.** Prospects of the quantitative time forecast of volcanic eruptions // IUGG99 Birmingham abstracts. 1999. Volume B. P. 157.
 16. **Malyshev A.I., Malysheva L.K.** Pyroclastic flows and posteruptive lahars as the relief-forming factor of a Mars surface // IUGG99 Birmingham abstracts. 1999. Volume A. P. 52.
 17. **Malyshev A.I., Tikhonov I.N.** Foreshock-aftershock sequences of destructive earthquakes in Southern Kuril arc // IUGG99 Birmingham abstracts. 1999. Volume A. P. 154.
 18. **Tikhonov I.N., Malyshev A.I.** A possibility of short-term prediction of origin time for disastrous earthquakes in Southern Kuril arc // IUGG99 Birmingham abstracts. 1999. Volume A. P. 150.
 19. **Малышев А.И.** Пульсационная зональность как следствие закономерностей развития магматических систем // Физико-химические проблемы эндогенных геологических процессов: мат-лы межд. симп. Москва: ИГЕМ РАН, 1999. С. 42–43.
 20. **Малышев А.И.** Формирование расслоенных интрузивов как результат полицикличности развития магматических систем // Физико-химические проблемы эндогенных геологических процессов: мат-лы межд. симп. Москва: ИГЕМ РАН, 1999. С. 43–44.
 21. **Малышев А.И., Молошаг В.П.** Сера в магматическом процессе // Физико-химические проблемы эндогенных геологических процессов: мат-лы межд. симп. Москва: ИГЕМ РАН, 1999. С. 44–45.
 22. **Malyshev A.I., Malysheva L.K.** An origin of valley networks and outflow valleys on the martian surface // Lunar and Planetary Sciences XXXI. Houston. 2000. Abs. 1125.
 23. **Малышев А.И.** Поведение серы в магматическом процессе // Петрография на рубеже XXI века – итоги и перспективы: Тр. Второго Всеросс. петрографического совещания. Сыктывкар, 2000. С. 73–75.
 24. **Malyshev A.I.** The self-development equation and a possibility of volcanic eruptions prediction // GeoCanada2000. Calgary. 2000. Abs. 877.
 25. **Malyshev A.I.** Regularities of foreshock-aftershock sequences for strongest world earthquakes (M7.0+) in 1973-1999 // GeoCanada2000. Calgary. 2000. Abs. 878.
 26. **Malyshev A.I.** The mathematical modeling of foreshock sequence before the disastrous Izmit earthquake (Ms=7.8) in 1999 // GeoCanada2000. Calgary. 2000. Abs. 879.
 27. **Malyshev A.I., Tikhonov I.N.** Some prediction results by modeling of earthquake sequences before and after strong (M7.0+) seismic events // The 2nd International Seismic-Volcanic Workshop On North-Japanese, Kurile-Kamchatkan, and Aleutian-Alaskan Subduction Processes. Onuma and Sapporo, Hokkaido, Japan. 1–7 July, 2000. P. 14–15.
 28. **Malyshev A.I.** Sulphur in a magmatic process // IAVCEI2000, Bali, Indonesia. 16–22.07.2000.
 29. **Malyshev A.I.** The sulphuric interception as ore-forming factor // 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro. August 06–17, 2000.
 30. **Malyshev A.I., Moloshag V.P.** The sulphuric interception in genesis of magmatic sulphide deposits // 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro. August 06–17, 2000.
 31. **Malyshev A.I.** Layered intrusions as the outcome of a polycyclical development of magmatic systems // 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro. August 06–17, 2000.
 32. **Malyshev A.I.** Pulsating zonality as a consequence of regularities of magmatic systems' development // 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro. August 06–17, 2000.
 33. **Moloshag V.P., Malyshev A.I.** The role of native sulphur deposits of mature arc in pyrites deposits genesis // 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro. August 06–17, 2000.

34. *Malyshev A.I., Malysheva L.K.* Problems of the Martian relief-forming // 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro. August 06–17, 2000.
35. *Malyshev A.I., Malysheva L.K.* Water, volcanism and problems of the Martian relief-forming // European Geophysical Society, XXVI General Assembly, Nice, France, 25–30 March 2001.
36. *Malyshev A.I., Malysheva L.K.* The degasification model of Mars' planetary evolution // European Geophysical Society, XXVI General Assembly, Nice, France, 25–30 March 2001.
37. *Malyshev A.I., Malysheva L.K.* Sulphur in high-temperature terrestrial processes and lost oceans of Venus // European Geophysical Society, XXVI General Assembly, Nice, France, 25–30 March 2001.
38. *Мальшев А.И.* Основное возражение против экстраполяции плитной тектоники в домезозойское время. Тектоника неогей: общие и региональные аспекты. Мат-лы XXXIV-го Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2001. Т. 2. С. 12–13.
39. *Мальшев А.И., Мальшева Л.К.* Тектоника плит с точки зрения планетарной эволюции. Тектоника неогей: общие и региональные аспекты. Мат-лы XXXIV-го Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2001. Т. 2. С. 13–16.
40. *Malyshev A.I., Malysheva L.K.* Mars' Planetary Evolution and the Problems of Earth Geodynamics // Lunar and Planetary Science XXXII. Houston, 2001. abs. 1323.
41. *Malyshev A.I., Malysheva L.K.* The degasification model of planetary evolution and the scheme of planetary evolution for Earth // GSA-GSL Earth System Processes Meeting (Edinburgh), 2001. Abs. 7426.
42. *Malyshev A.I.* Sulphur in high-temperature natural processes // GSA-GSL Earth System Processes Meeting (Edinburgh), 2001. Abs. 7429.
43. *Malyshev A.I.* The equation of self-developing natural processes // GSA-GSL Earth System Processes Meeting (Edinburgh), 2001. Abs. 7433.
44. *Malyshev A.I.* The equation of self-developing natural processes and prospects of its use for the prediction of geophysical catastrophes // IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly in Hanoi, Vietnam, August 19-31, 2001. Abs. 1480.
45. *Мальшев А.И.* Современные сейсмофокальные зоны стыка Евразийской, Тихоокеанской и Филиппинской плит и некоторые проблемы палеогеодинамических реконструкций Урала // Постколлизийная стадия развития подвижных поясов: мат-лы междунац. конф. VII чтения А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. С. 110–112.
46. *Tikhonov I.N., Malyshev A.I.* A Model of seismic process for purposes of a large earthquakes prediction (by example of the Southern Kurile Islands area) // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: мат-лы I Междунац. школы-семинара. Красноярск. 2001. С. 105–106.
47. *Мальшев А.И., Мальшева Л.К.* Автоколебательный режим дегазационных процессов как фундаментальная черта планетарной эволюции // Ритмичность и цикличность в геологии как отражение общих законов развития: мат-лы Семинара ОГПГГН РАН. Москва, 7–8 февраля 2002. С. 20.
48. *Мальшев А.И., Тихонов И.Н.* Ретроспективный анализ плотности сейсмического потока по параметру N перед сильными ($M > 7.0$) землетрясениями Японии // Структура, геодинамика и металлогения охотского региона и прилегающих частей северо-западной тихоокеанской плиты: мат-лы Междунац. науч. симп. 24–28 сентября 2002 г. Южно-Сахалинск. 2002. С. 10.
49. *Malyshev A.I., Tikhonov I.N.* The nonlinearity of seismic process as result of studying JMA, USGS and some other seismic catalogues // IUGG2003. Sapporo, Japan. June 30 – July 11. Volume A. P. 153.
50. *Malyshev A.I.* The liquid-gas transitions in high-temperature fluids and its role in the Earth crust formation // IUGG2003. Sapporo, Japan. June 30 – July 11. Volume A. P. 175.

51. *Malyshev A.I., Malysheva L.K.* The degasification model of planetary evolution // IUGG2003. Sapporo, Japan. June 30 – July 11. Volume A. P. 177.
52. *Малышев А.И.* Серный перехват в эндогенном рудообразовании // Вулканизм и геодинамика: мат-лы докл. II Всеросс. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 544–550.
53. *Малышев А.И., Малышева Л.К.* Летучие в планетарной эволюции // Вулканизм и геодинамика: мат-лы докл. II Всеросс. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург. 2003. С. 32–38.
54. *Малышев А.И.* Изотопная сепарация серы в высокотемпературных эндогенных процессах // Металлогения древних и современных океанов. Достижения на рубеже веков. Т. 2. Миасс: ИМин УрО РАН, 2004. С. 79–85.
55. *Малышев А.И.* Значение фазовых переходов «газ - жидкость» для образования эндогенного кремнезема // Кварц, Кремнезем. мат-лы межд. семинара. Сыктывкар: ГИ Коми НЦ УрО РАН, 2004. С. 217.
56. *Малышев А.И., Тихонов И.Н.* Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса (первое приближение) // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов: мат-лы Всеросс. конф. с международным участием. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. Т. 2. С. 53–57.
57. *Малышев А.И.* Роль серного перехвата в образовании сульфидных руд магматических месторождений Кольского полуострова // Петрология и рудоносность регионов СНГ и Балтийского щита: мат-лы Межд. (X всеросс.) петрограф. совещания. Т. 3. Апатиты: Кольский НЦ РАН, 2005. С. 181–183.
58. *Малышев А.И.* Физико-химическая эволюция эндогенных флюидов и ее значение для формирования земной коры // Метаморфизм, космические, экспериментальные и общие проблемы петрологии: мат-лы Междунар. (X всеросс.) петрограф. совещания. Т. 4. Апатиты: Кольский НЦ РАН, 2005. С. 168–170.
59. *Малышев А.И.* Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса во времени // Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере: мат-лы XI Межд. конф. Сыктывкар: ГИ Коми НЦ УрО РАН, 2005. С. 228–230.
60. *Малышев А.И., Малышева Л.К.* Зоны естественного углеводородного синтеза и проблема возникновения планетарной жизни в условиях Земли и Марса // Мат-лы XV Росс. совещ. по эксперим. минералогии Сыктывкар: ГИ Коми НЦ УрО РАН, 2005.
61. *Малышев А.И.* Серный перехват в магматическом рудообразовании // Мат-лы XV Росс. совещ. по эксперим. минералогии Сыктывкар: ГИ Коми НЦ УрО РАН, 2005.
62. *Малышев А.И., Виноградов А.М.* Особенности колчеданного рудообразования в зависимости от эволюции геодинамического режима Уральского подвижного пояса // Геодинамика формирования подвижных поясов Земли: мат-лы межд. науч. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 206–211.
63. *Малышев А.И.* Специфика колчеданного рудообразования в субмаринных условиях // Металлогения древних и современных океанов: мат-лы межд. конф. Миасс: ИМин УрО РАН, 2007.
64. *Малышев А.И.* Газы в эволюции магматических систем // Эндогенное оруденение в подвижных поясах: Мат-лы межд. науч. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 25–28.
65. *Малышев А.И., Виноградов А.М., Бушарина С.В.* Флюидно-энергетический поток в формировании рудных узлов и рудоносных зон фемической специализации (на примере Оренбургского пересечения Урала) // Эндогенное оруденение в подвижных поясах: мат-лы межд. науч. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 28–31.
66. *Малышев А.И.* Планетарные дегазационные процессы как фактор рудообразования // Рудогенез: мат-лы межд. науч. конф. Екатеринбург: ИМин УрО РАН, 2008.
67. *Виноградов А.М., Малышев А.И., Бушарина С.В.* Физические поля и минерагения

- Урало-Мугоджарской провинции // Рудогенез: мат-лы межд. науч. конф. Екатеринбург: ИМин УрО РАН, 2008.
68. *Виноградов А.М., Малышев А.И., Бушарина С.В.* О магматизме, разломных структурах, минерации и углеводородогенерации в Центральном секторе севера Евразии // Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности: мат-лы всеросс. конф. с участием иностранных ученых. Тюмень–Новосибирск, 2008. С. 47–50.
 69. *Малышева Л.К., Малышев А.И.* Планетарный вулканизм как фактор создания условий для зарождения жизни // Вулканизм и геодинамика: мат-лы IV Всеросс. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 94–95.
 70. *Малышев А.И., Демянчук Ю.В., Малышева Л.К.* Возможность деформационного прогноза пароксизмальных направленных извержений вулканов с переходной экструживно-стратовулканической структурой постройки // Вулканизм и геодинамика: мат-лы IV Всеросс. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 633–636.
 71. *Виноградов А.М., Малышев А.И.* Рудные зоны и рудные узлы фемической специализации на Южном Урале (геофизический аспект) // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения: мат-лы III межд. конф.. Т. 1. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 110–113.
 72. *Malyshov A.I., Demyanchuk Ju.V.* The Deformation Prediction Possibility for Paroxysmal Directed Eruptions (on the Example of Bezymianny Volcano Eruptions) // Cities on Volcanoes 6th, Tenerife 2010. CoV6/1.1/P/57. Puerto de la Cruz: ITER, 2010. P. 33–34.
 73. *Малышев А.И.* Условия формирования зоны окисления Гайского медноколчеданного месторождения // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования: мат-лы Всеросс. конф. М.: ИГЕМ РАН, 2010.
 74. *Малышев А.И.* Газовый фактор в развитии эндогенных процессов // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. М.: ГЕОС, 2010. С. 341–344.
 75. *Малышева Л.К., Малышев А.И.* Зоны естественного углеводородного синтеза как фактор формирования предбиологических состояний // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. М.: ГЕОС, 2010. С. 344–347.

Публикации в сборниках:

1. *Малышев А.И.* Физико-химическая эволюция высокотемпературных эндогенных флюидов и ее значение для формирования месторождений полезных ископаемых // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 840–855.
2. *Малышев А.И.* Динамическая модель магматического процесса // Геология Урала и сопредельных территорий. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 16–39.
3. *Малышев А.И.* Серный перехват в эндогенном рудообразовании // Геология Урала и сопредельных территорий. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 362–400.

Подписано к печати _____

Формат 60 × 84 1/16

Уч.-изд. л. ____

Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано с оригинал-макета в типографии ООО “ИРА УТК”

620219, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42.